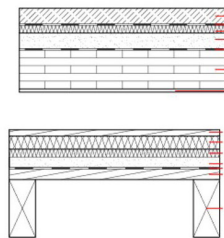
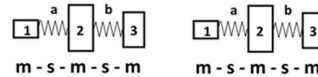
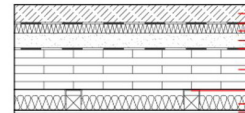
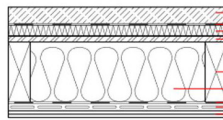


RESONANZFREQUENZEN UND TRITTSCHALLÜBERTRAGUNG

Forschung zur Schallschutznormung im Holzbau



$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)}$$



$$f_0 = \frac{1}{2^{3/2}\pi} \left\{ \pm \left[\begin{array}{c} \frac{s'_a + s'_b}{m_2} + \frac{s'_a}{m_1} + \frac{s'_b}{m_3} \\ \left(\frac{s'_a + s'_b}{m_2} + \frac{s'_a}{m_1} + \frac{s'_b}{m_3} \right)^2 \\ -4s'_a s'_b \left(\frac{1}{m_1 m_2} + \frac{1}{m_2 m_3} + \frac{1}{m_1 m_3} \right) \end{array} \right]^{1/2} \right\}^{1/2}$$

Resonanzfrequenzen und Trittschallübertragung - Forschung zur Schallschutznormung im Holzbau

Endbericht

Autor:innen

Bernd Nusser¹, Christian Lux¹, Maximilian Neusser², Selina Vavřík-Kirchsteiger³,
Daniel Urbán², Alexander Niemczanowski⁴, Alexander Stenitzer¹, Heinz Ferk³,
Herbert Müllner⁴

¹ Holzforschung Austria (HFA)

² TU Wien – Forschungsbereich Bauphysik

³ TU Graz – Labor für Bauphysik

⁴ Technologisches Gewerbemuseum (TGM)

Auftraggeber

Fachverband der Holzindustrie Österreich

Gefördert durch

 Waldfonds
Republik Österreich

Eine Initiative des Bundesministeriums
für Land- und Forstwirtschaft, Regionen
und Wasserwirtschaft



FFG
Forschung wirkt.

Wien/Graz, November 2024

Dieser Endbericht fasst die Arbeiten der Forschungseinrichtungen Holzforschung Austria, Technologisches Gewerbemuseum, TU Graz – Labor für Bauphysik und TU Wien – Forschungsbereich Bauphysik im zugrundeliegenden Forschungsprojekt zusammen. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei den Autor:innen der jeweiligen Kapitel.

Das Forschungsprojekt wurde aus Mitteln des Waldfonds, einer Initiative des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft gefördert und im Rahmen des Programms Think.Wood der Österreichischen Holzinitiative durchgeführt.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	7
2	Material und Methoden.....	8
2.1	Entwicklung einer praktikablen Methode zur Resonanzfrequenzmessung	8
2.1.1	Messungen im Akustik Center Austria.....	8
2.1.2	Messungen an der TU Wien	20
2.1.3	Messungen an der TU Graz.....	44
2.2	In situ Messungen von Decken.....	47
2.2.1	Messungen der HFA	47
2.2.2	Messungen der TU Graz.....	50
2.2.3	Messungen des TGM.....	51
2.3	Abgleich des gemessenen und prognostizierten Trittschallschutzes und der kritischen Resonanzfrequenz	55
2.4	Erstellen eines Bauteilkatalogs mit rechnerischer Analyse der Resonanzfrequenzen von typischen Trenndecken	57
2.5	Analyse des Anforderungsdeskriptors „Resonanzfrequenz“	58
3	Ergebnisse und Diskussion	62
3.1	Entwicklung einer praktikablen Methode zur Resonanzfrequenzmessung	62
3.1.1	Scherenmethode	62
3.1.2	Phasendifferenzmethode	63
3.1.3	Ergebnisse zur Bestimmung der Federsteifigkeiten von Abhängesystemen mit der Phasendifferenzmethode	66

3.2	In situ Messungen von Decken	72
3.2.1	Gebäude InSitu 1	72
3.2.2	Gebäude InSitu 2	74
3.2.3	Gebäude InSitu 3	76
3.2.4	Gebäude InSitu 4	78
3.2.5	Gebäude InSitu 5	80
3.2.6	Gebäude InSitu 6	93
3.2.7	Gebäude InSitu 7	101
3.2.8	Gebäude InSitu 8	103
3.2.9	Zusammenfassung.....	106
3.3	Abgleich des in situ gemessenen und prognostizierten Trittschallschutzes und der kritischen Resonanzfrequenz.....	107
3.4	Erstellen eines Bauteilkatalogs mit rechnerischer Analyse der Resonanzfrequenzen von typischen Trenndecken.....	111
3.5	Analyse des Anforderungsdeskriptors „Resonanzfrequenz“	111
4	Zusammenfassung.....	115
5	Literaturverzeichnis	118
	Anhang 1: Mess- und Auswertanleitung.....	120
	Anhang 2: Bestimmung der Messzonen.....	126
	Anhang 3: Bauteilkatalog Decken	132
	Anhang 4: Prognose Trittschalldämmung in situ	139

EXECUTIVE SUMMARY

Gemäß ÖNORM B 8115-5:2021 kann die Masse-Feder-Masse-Resonanz von Bauteilen zur Klassifizierung des Schallschutzes von Gebäuden herangezogen werden. Im Zuge des Projektes wurden folgende zwei Methoden zur in situ Resonanzfrequenzmessung entwickelt:

1. Scherenmethode
2. Phasendifferenzmethode

Die prinzipielle Eignung beider Methoden zu Bestimmung der Resonanzfrequenz von Decken in Holzbauweise konnten sowohl für Labor als auch für in situ Messungen nachgewiesen werden. Es zeigte sich jedoch, dass die Anwendbarkeit und Aussagekraft der beiden Messmethoden vom vorhandenen Deckenaufbau und ev. auch der Deckengeometrie und den Lagerungsbedingungen abhängt. Probleme gab es u.a. bei sehr steifen Trittschalldämmungen oder Decken mit Trockenestrichen.

Bei Decken, welche Dreimassenschwinger darstellen, wird die Trittschalldämmung im Wesentlichen durch die „untere“ Resonanzfrequenz bestimmt. Entgegen der Angaben in der ÖNORM B 8115-5:2021 wird bei Dreimassenschwingern deshalb die untere Resonanzfrequenz als maßgeblich angesehen.

Eine Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Resonanzfrequenzen zeigt, dass häufig ein höherer Zahlenwert errechnet als gemessen wird. Ein wesentlicher Grund hierfür wird in der Unsicherheit der Eingangsdaten (Materialdaten) und den Modellgrenzen für die Berechnung gesehen. Es hat sich außerdem gezeigt, dass zur Berechnung von Systemen mit abgehängten Decken zumindest die Steifigkeit der Abhängesysteme (z. B. Federschiene oder Direktschwingabhängiger) mit berücksichtigt werden sollte. Die errechnete untere Resonanzfrequenz typischer Trenndecken in Holzbauweise liegt zwischen 24 Hz und 55 Hz, wobei bei Analysen von 100 errichteten Brettspertholzdecken auch untere Resonanzfrequenzen von bis zu 98 Hz festgestellt werden konnten.

Die Prognose des Trittschallschutzes in Gebäude kann durch das betrachtete „differenzierte Verfahren“ vor allem dann mit erhöhter Zuverlässigkeit erfolgen, wenn der Norm-Trittschallpegel der Decke selbst möglichst exakt bekannt ist, d.h. im Idealfall entspricht der Deckenaufbau einem Bauteil aus einem bestehenden Bauteilkatalog mit Labor-Messwerten. Es hat sich auch gezeigt, dass die Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwerts zu einer geringeren negativen Abweichung zwischen Messwert und Prognosewert führt.

Die Analyse von 100 in situ Messungen an Holzmassivdecken haben ergeben, dass die Zuordnung einer Deckenkonstruktion zu einer Klasse gemäß ÖNORM B 8115-5:2021 auf Basis der errechneten Resonanzfrequenz im Vergleich zu einer Klassenzuordnung auf Basis des gemessenen Spektrum-Anpassungswertes $C_{1,50}$ in den meisten Fällen zu unterschiedlichen Klassenzuordnungen führt. Das zeigte sich auch in einer mangelnden Korrelation zwischen der Resonanzfrequenz und dem Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50}$. Somit

stellt die „ODER“-Bedingung der Klasseneinteilung nach ÖNORM B 8115-5:2021 für Deckenkonstruktionen keine Bewertungsgleichwertigkeit dar.

1 Einleitung

Die österreichische Schallschutznorm ÖNORM B 8115 befindet sich derzeit in der Überarbeitung bzw. sind 2021 die Teile 2 und 5 neu erschienen. Teil 5 beschäftigt sich unter anderem mit der Klassifizierung des Schallschutzes von Gebäuden, Nutzungseinheiten und Räumen und geht dabei von 5 Schallschutzklassen A bis E aus. Zur Einstufung in die Schallschutzklassen A-C gemäß ÖNORM B 8115-5:2021 werden die Resonanzfrequenzen der Bauteile benötigt. Für mehrschichtige Leichtbauteile sind sowohl die valide Berechnungs- wie auch die in situ Messmethodik jedoch noch nicht geklärt. Um einer diesbezüglichen Benachteiligung des Leichtbaus entgegen zu wirken, muss die Validität der getroffenen Klassenzuordnungsparameter untersucht und die nötigen Grundlagen zur Ermittlung und Prognose der Resonanzfrequenz von Holzbauteilen geschaffen und Bauteilkennzahlen ermittelt werden. Des Weiteren sollen für die künftige ÖNORM B 8115-4, für verschiedene Bauweisen, neue Bauteilkataloge erarbeitet werden. Um für den Holzbau hier eine praxistaugliche Hilfestellung zu bieten, sind insbesondere geeignete Trenndecken in Holzrahmen- und Holzmassivbauweise für diesen Katalog wichtig. Zur Berücksichtigung der dabei vorhandenen Flankenübertragung gibt es aktuell verschiedene Vorschläge für Prognosemethoden im Holzbau (Rabold et al. 2020). Die Prognoseunsicherheiten dieser Methoden, insbesondere für in österreichisch typische Bauweisen, sind jedoch derzeit nicht ausreichend geklärt, was zu Unsicherheiten bei Planern und Ausführenden führt. Um diese Situation zu verbessern und die Unsicherheit der Prognosemethoden für aktuelle Trenndeckenaufbauten in Holzbauweise zielgerechter quantifizieren zu können, sind die Ergebnisse aus Prognoserechnungen mit Daten aus in situ-Messungen abzugleichen und entsprechende, praxismgerechte Schlüsse zu ziehen.

Folgende Forschungsfragen sollen durch das Projekt beantwortet werden:

- A.) Lässt sich die (in Bezug auf die Angaben der ÖNORM B 8115-5:2021 ungünstigste) Resonanzfrequenz einer Trenndecke in Holzbalken- und Holzmassivbauweise (Zwei- und Dreimassenschwinger) baupraktisch anwendbar feststellen?
- B.) Lässt sich eine praxistaugliche Korrelation zwischen in situ gemessenen mit errechneten Resonanzfrequenzen darstellen?
- C.) Welche Resonanzfrequenzen weisen typische Trenndecken in Holzbalken- und Holzmassivbauweise auf bzw. worauf muss in der Praxis geachtet werden, in Hinblick auf die Forderungen der ÖNORM B 8115-5:2021?
- D.) Mit welchen Unsicherheiten der neuen Prognosemethoden gem. (Rabold et al. 2020) ist in der Praxis für typische Trenndecken in Holzbalken- und Holzmassivbauweise zu rechnen?

Zur Beantwortung der aufgeführten Forschungsfragen wurde das Projekt in folgende fünf Arbeitspakete (AP) unterteilt und der vorliegende Forschungsberichts derart strukturiert.

- AP 1. Entwicklung einer praktikablen Methode zur Resonanzfrequenzmessung
- AP 2. In situ Messungen von Decken
(Trittschallschutzes und Resonanzfrequenz von Decken)
- AP 3. Abgleich des gemessenen und prognostizierten Trittschallschutzes und der kritischen Resonanzfrequenz
- AP 4. Erstellen eines Bauteilkatalogs mit rechnerischer Analyse der Resonanzfrequenzen von typischen Trenndecken
- AP 5. Analyse des Anforderungsdeskriptors „Resonanzfrequenz“

2 Material und Methoden

Nachfolgend werden die verwendeten Materialien und Methoden bei Bearbeitung der jeweiligen Arbeitspaketen erläutert.

2.1 Entwicklung einer praktikablen Methode zur Resonanzfrequenzmessung

Zur Entwicklung einer praktikablen Messmethode wurden Laboruntersuchungen im Akustik Center Austria, der TU Wien und im Labor für Bauphysik der TU-Graz durchgeführt. Dabei wurde auf den Erkenntnissen, welche im bereits abgeschlossenen Forschungsprojekt Sound.Wood.Austria (Holzforschung Austria und TU Graz) zum Thema Resonanzfrequenzmessung erarbeitet wurden, aufgebaut. Dort wurde u.a. eine Methode, welche auf der Auswertung der Phasendifferenz beruht, an kleinen Versuchskörpern mit $(1100 \times 1300) \text{ mm}^2$ entwickelt (Lux et al. 2024). Bei den Arbeiten in AP 1 im gegenständlichen Projekt sollte diese Methode u.a. auf große Versuchskörper überführt und weiterentwickelt werden.

2.1.1 Messungen im Akustik Center Austria

Im ersten Schritt wurden Testmessungen an großen Deckenaufbauten durchgeführt. Dabei kamen verschiedene Denksysteme zum Einsatz. Abbildung 1 zeigt eine Messsituation im M-Prüfstand des Akustik Center Austria. Die Größe der untersuchten Deckensysteme betrug $(5,24 \times 4,23) \text{ m}^2$.



Abbildung 1: Messsituation am M-Prüfstand des Akustik Center Austria. Links: Estrich mit Messtechnik auf der Versuchsdecke (Anregeseite), rechts: Untersicht einer Versuchsdecke mit angebrachten Beschleunigungssensoren im Empfangsraum

Folgende Versuchskörper (VK-ACA) wurde im Zuge des Projektes im Akustik Center Austria hinsichtlich Resonanzfrequenz untersucht:

- VK-ACA 1. Holzrahmendecke (roh), zweischalig
- VK-ACA 2. Holzrahmendecke mit Zementestrichaufbau, dreischalig
- VK-ACA 3. Holzrahmendecke mit Trockenestrichaufbau, dreischalig
- VK-ACA 4. Brettspertholzdecke mit Zementestrichaufbau, zweischalig
- VK-ACA 5. Brettspertholzdecke und Splittschüttung mit Zementestrichaufbau, zweischalig
- VK-ACA 6. Brettspertholzdecke und Splittschüttung mit Zementestrichaufbau, zweischalig
- VK-ACA 7. Brettspertholzdecke und Splittschüttung mit Zementestrichaufbau, zweischalig
- VK-ACA 8. Brettspertholzdecke und Splittschüttung mit Zementestrichaufbau, zweischalig
- VK-ACA 9. Brettspertholzdecke und Blähbetonschüttung mit Zementestrichaufbau, zweischalig
- VK-ACA 10. Brettspertholzdecke und Blähbetonschüttung mit Zementestrichaufbau, zweischalig
- VK-ACA 11. Betondecke und Blähbetonschüttung mit Zementestrichaufbau, zweischalig
- VK-ACA 12. Betondecke und Blähbetonschüttung mit Zementestrichaufbau, zweischalig

VK-ACA 13. Betondecke und Blähbetonschüttung mit Zementestrichaufbau,
zweischalig

VK-ACA 14. Brettsperrholzdecke und Splittschüttung mit Zementestrichaufbau,
zweischalig

VK-ACA 15. Brettsperrholzdecke und Splittschüttung mit Zementestrichaufbau,
zweischalig

Nachfolgend werden die konkreten Bauteilaufbauten wiedergegeben:

Tabelle 1: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 1) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
22,0	OSB-Platte
240,0	Balken (120 × 240) mm ² , Abstand e = 495 mm, mit
100,0	Gefachdämmung (Glaswolle)
0,1	Dampfbremse
24,0	Sparschalung
12,5	Gipsfaserplatte
298,6	Gesamtdicke

Tabelle 2: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 2) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
30,0	Trittschalldämmung (Isover, TDPT mit $s' = 10 \text{ MN/m}^3$)
22,0	OSB-Platte
240,0	Balken (120 × 240) mm ² , Abstand e = 495 mm, mit
100,0	Gefachdämmung (Glaswolle)
0,1	Dampfbremse
24,0	Sparschalung
12,5	Gipsfaserplatte
388,6	Gesamtdicke

Tabelle 3: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 3) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
25,0	Estrichelement (Fermacell, 2 E 33 (EE 25 HF 10), 2 × 12,5 mm Gipsfaserplatten mit
10,0	Trittschalldämmung (Holzfaserdämmung mit $s' = 130 \text{ MN/m}^3$)
22,0	OSB-Platte
240,0	Balken (120 × 240) mm ² , Abstand e = 495 mm, mit
100,0	Gefachdämmung (Glaswolle)
0,1	Dampfbremse
24,0	Sparschalung
12,5	Gipsfaserplatte
388,6	Gesamtdicke

Tabelle 4: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 4) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
30,0	Trittschalldämmung (Isover, TDPT mit $s' = 10 \text{ MN/m}^3$)
180,0	Brettsperrholzdecke
270,0	Gesamtdicke

Tabelle 5: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 5) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
30,0	Trittschalldämmung (Joma, EPS mit $s' = 57 \text{ MN/m}^3$)
100,0	Splittschüttung
180,0	Brettsperrholzdecke
370,0	Gesamtdicke

Tabelle 6: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 6) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
35,0	Trittschalldämmung (Isover, Akustic EP 1 mit $s' = 7 \text{ MN/m}^3$)
100,0	Splittschüttung
180,0	Brettsperrholzdecke
375,0	Gesamtdicke

Tabelle 7: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 7) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
40,0	Trittschalldämmung (Herotec, Tempus Rock Platte STW SE 35-5 mm mit $s' = 6 \text{ MN/m}^3$)
100,0	Splittschüttung
180,0	Brettsperrholzdecke
380,0	Gesamtdicke

Tabelle 8: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 8) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
30,0	Trittschalldämmung (Steico, Steico therm SD mit $s' = 30 \text{ MN/m}^3$)
100,0	Splittschüttung
180,0	Brettsperrholzdecke
370,0	Gesamtdicke

Tabelle 9: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 9) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
30,0	Trittschalldämmung (Steico, Steico therm SD mit $s' = 30 \text{ MN/m}^3$)
100,0	Blähschüttung
180,0	Brettsperrholzdecke
370,0	Gesamtdicke

Tabelle 10: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 10) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
40,0	Trittschalldämmung (Herotec, Tempus Rock Platte STW SE 35-5 mm mit $s' = 6 \text{ MN/m}^3$)
100,0	Blähbetonschüttung
180,0	Brettsperrholzdecke
380,0	Gesamtdicke

Tabelle 11: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 11) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
30,0	Trittschalldämmung (Knauf Insulation, Trittschall Dämmplatte TPT 03 mit $s' = 9 \text{ MN/m}^3$)
80,0	Blähbetonschüttung
140,0	Brettsperrholzdecke
310,0	Gesamtdicke

Tabelle 12: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 12) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
11,0	Trittschalldämmung (Getzner, Acoustic Floor Mat 29 mit $s'_t = 10 \text{ MN/m}^3$)
80,0	Blähbetonschüttung
140,0	Brettsperrholzdecke
291,0	Gesamtdicke

Tabelle 13: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 13) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
30,0	Trittschalldämmung (Steico, Steico flex SD mit $s' = 18 \text{ MN/m}^3$)
80,0	Blähbetonschüttung
140,0	Brettsperrholzdecke
310,0	Gesamtdicke

Tabelle 14: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 14) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
30,0	Trittschalldämmung (Steico, Steico flex SD mit $s' = 18 \text{ MN/m}^3$)
100,0	Splittschüttung
180,0	Brettsperrholzdecke
370,0	Gesamtdicke

Tabelle 15: Aufbau von Versuchskörper im Akustik Center Austria (VK-ACA 15) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60,0	Zementestrich (Fertigelemente, Holzforschung Austria)
35,0	Trittschalldämmung (Isover, Akustic EP 1 mit $s' = 7 \text{ MN/m}^3$)
100,0	Splittschüttung
180,0	Brettsperrholzdecke
375,0	Gesamtdicke

Die Ermittlung der Resonanzfrequenz erfolgte dabei durch zwei Methoden:

1. Ballanregung (Anregung mit dem japanischen Gummiball)
Diese Systematik wurde vor der Erstellung der Methodenanleitung der TU Wien verwendet.
2. Impulshammeranregung (Anregung mit einem Impulshammer)
Diese Systematik wurde nach der Erstellung der Methodenanleitung (Version 1) der TU Wien verwendet.

Für die Untersuchungen wurde die Messtechnik entsprechend Tabelle 16 eingesetzt:

Tabelle 16: Bei den Untersuchungen im Akustik Center Austria eingesetzte Messtechnik

Methode	Anregeseitig	Empfängerseitig	Analysator
1	Beschleunigungssensor (Referenzsensor, BS1)	Beschleunigungssensor (BS2 – BS6)	Sinus Soundbook_MK2 (8-kanalig)
2	Impulshammer (DJB, Instrumented Impact Hammer IH-10 - 10kN Range)	Beschleunigungssensor	Sinus Soundbook_MK2 (8-kanalig)

2.1.1.1 Ballanregung

Bei der Anregung mit dem japanischen Gummiball wurde folgende Systematik zur Ermittlung der Resonanzfrequenz gewählt:

- Zuerst wurden die Beschleunigungssensoren (BS) gemäß den Skizzen in Abbildung 2 und Abbildung 3 positioniert. Dafür wurde zum einen das Zentrum des gesamten Deckenaufbaus und zum anderen das Zentrum der Estrichelemente gewählt.
- Danach wurde die jeweilige Estrichplatte, auf der der Referenzsensor platziert war mit dem Ball angeregt.
- Dafür wurde der Ball gemäß ÖNORM EN ISO 10143-3 aus einem 1 m Höhe an sechs (frei wählbaren) Stellen fallen gelassen. Aus diesen sechs Anregungen wurde eine Übertragungsfunktion zwischen der Beschleunigungen an BS1 (Ref) und BS2-6 zur Auswertung aufgezeichnet. Für die Messungen wurde die in Tabelle 2 angeführte Messtechnik benutzt.

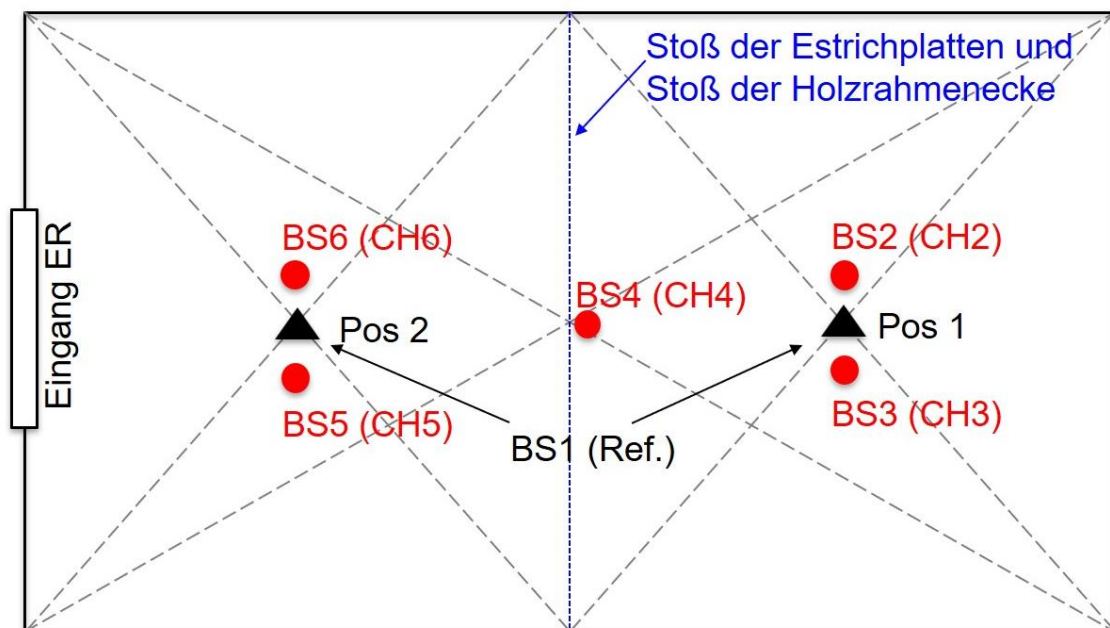


Abbildung 2: Skizze der Sensorpositionen bei den Messungen mit der Holzrahmendecke, schwarz: Deckenoberseite, rot: Deckenunterseite

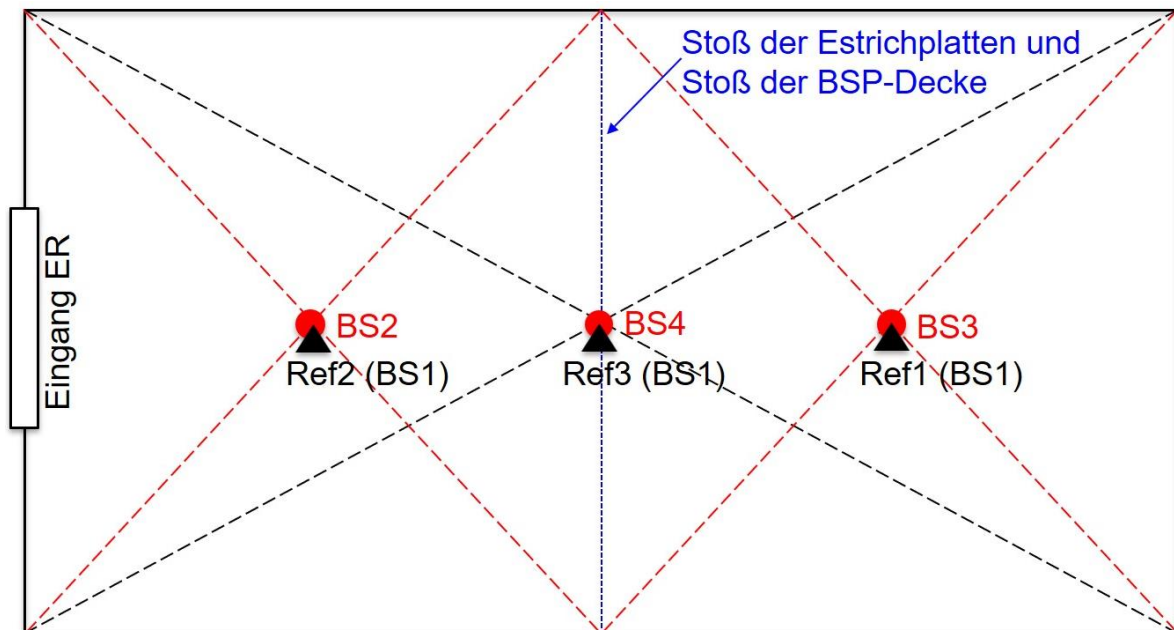


Abbildung 3: Skizze der Sensorpositionen bei den Messungen mit der Brettsperrholzdecke

Die Auswertung der Messdaten erfolgte dabei so, wie in (Lux et al. 2024) und (Hierl 2024) beschrieben. Im ersten Schritt wurde aus der gewonnenen Übertragungsfunktion, in diesem Fall aus den jeweiligen Beschleunigungs-Messgrößen (Beschleunigung/Beschleunigung), die Amplitudeninformation und die Phaseninformation berechnet. Mit den beiden Verläufen und den Informationen aus den Pegelmessungen mit Normhammerwerk und dem japanischen Gummiball wurde versucht, einen Phasensprung zu ermitteln bei dem eine Phasenverschiebung zwischen 90° bis 180° auftritt. Wobei im Allgemeinen die Resonanzfrequenz bei zweischaligen Systemen bei einer Phasenverschiebung von 90° auftritt. Anhand der Lage des Phasensprungs wurde der Resonanzpeak im Verlauf der Amplitudeninformation verortet. Die festgelegte Spitze des Peaks im Amplitudenverlauf gibt die Resonanzfrequenz an.

2.1.1.2 Zusätzliche Messungen zur Unterstützung der Resonanzfrequenzmessung

Zur Unterstützung dieses Verfahrens wurde der Norm-Trittschallpegel L_n (in dB) mit den Normhammerwerk und der maximale Trittschallpegel $L_{i,Fmax}$ (in dB) mit dem japanischen Gummiball gemäß ÖNORM EN ISO 10140-3 aufgezeichnet. In diesen Verläufen kann sich, nach dem Auftreten der Resonanzfrequenz, ein Abfall von 18 dB / Oktave einstellen. Wenn also ein Peak auftritt und sich ein solcher Abfall zeigt ist das ein Hinweis auf eine Resonanz. Somit kann die Resonanzfrequenz orientierend einem Terzband zugeordnet werden.

2.1.1.3 Impulshammeranregung

Bei der Anregung mit dem Impulshammer wurde folgende Messmethodik zur Ermittlung der Resonanzfrequenz gewählt (Erstversion der Phasendifferenzmethode):

- Zuerst wurden die Messfelder gemäß der Skizze in Abbildung 4 eingemessen. Danach wurden je Messfeld zwei (frei wählbare) Punkte festgelegt.
- Diese Punkte wurden dann mit einem Hilfskoordinatensystem eingemessen und dokumentiert. Dieses Hilfskoordinatensystem sollte so gewählt werden, dass die Punkte auf der Unterseite der Decke, anhand dessen, eingemessen werden können. Dies ist wichtig, da für die Messung die Messtechnik (gemäß Tabelle 2) so gut wie möglich übereinander platziert werden sollte.
- In diesem Fall erfolgte die Anregung und Aufzeichnung mit dem Impulshammer. Dazu wurde sechsmal auf dem jeweiligen Punkt in den Messfeldern an der Deckenoberseite angeregt. Auch hier wurde eine Übertragungsfunktion zwischen anregender Kraft (Impulshammer) und der Beschleunigung an der Deckenunterseite über diese sechs Anregungen aufgezeichnet.

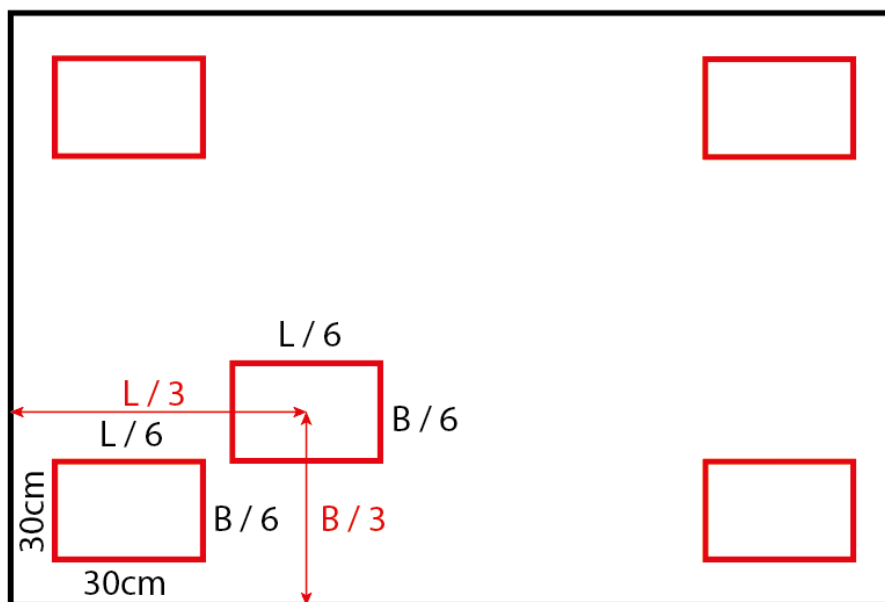


Abbildung 4: Skizze der Sensorpositionen bei Messungen mit der entwickelten Phasendifferenzmethode

Die Auswertung der Messdaten erfolgte analog zu der vorher beschriebenen Auswertung (siehe Abschnitt 2.1.1.1 auf Seite 15). Da hier ein Kraftsensor verwendet wird, liegt eine klassische Übertragungsfunktion vor:

- Akzeleranz = Beschleunigung / Kraft bzw. der Kehrwert
- Dynamische Masse = Kraft / Beschleunigung

Aus dieser Übertragungsfunktion werden wieder die Amplituden- und Phaseninformation berechnet. Auch hier wurde dann der Phasensprung gesucht, der die 90° Phasenverschiebung anzeigt, um den Resonanzpeak im Amplitudenverlauf zu finden. Zur Unterstützung wurden ebenfalls die Frequenzverläufe des Norm-Trittschallpegels und des maximalen Trittschallpegels verwendet.

2.1.1.4 Untersuchung von Abhängesystemen für Unterdecken

Im Rahmen des Projektes wurden in einer verkleinerten Deckenöffnung (Details siehe (Hierl 2024) und Abbildung 5) verschiedene Abhängesysteme hinsichtlich ihrer dynamischen Steifigkeit untersucht. Diese Systeme waren:

- Holzlattung, 30 mm (HL)
- Federschiene, 27 mm (Rigips)
- Schallentkoppelte Direktschwingabhänger, 125 mm U-Direktabhänger CD 125 gebogen, schallentkoppelt (Rigips)
- Elastomer Direktschwingabhänger, 150 mm (Rigips, AMC, EP 700 + Sylomer 15)

und wurden auf verschiedene Grunddecken montiert. Diese Decken waren:

- 140 mm Betondecke mit (1100 × 1300) mm²
- 140 mm Brettsperrholzdecke mit (1100 × 1300) mm²
- 160 mm Holzbalkendecke mit (1100 × 1300) mm²

wobei keine Bodenaufbauten verwendet wurden. Die Fläche der Unterdecken war (900 × 500) mm² und somit etwas kleiner als die Grunddecke. Das Ziel der Untersuchung war die Bestimmung der dynamischen Steifigkeit der oben angeführten Abhängesysteme. Um den Einfluss der Luftschicht zu reduzieren, wurde keine Abdichtung zum Rand hin vorgenommen. Zur Variation der Masse der Unterdecke wurden mehrere Lagen Gipskartonplatten angebracht (siehe Abbildung 6).

Um die Resonanzfrequenz der Abhängesystemen zu ermitteln, wurde der Beschleunigungssensor auf der Seite der Anregung mittig über der Unterdecke platziert. Der Beschleunigungssensor auf der Empfängerseite war so im Zentrum der Beplankung angebracht (siehe Abbildung 7), dass die beiden Sensoren übereinander lagen. Die Anregung erfolgte mittels Gummihammer ($m = 500 \text{ g}$) in der Nähe des anregeseitigen Sensors. Aus sechs Anregungen wurde eine gemittelte Übertragungsfunktion aufgezeichnet, die zur Berechnung der Phasen- und Amplitudeninformation herangezogen wurde.



Abbildung 5: Verkleinerte Deckenöffnung mit eingebauter Grunddecke (aus Beton) ohne Bodenaufbau, anregeseitig



Abbildung 6: Montierte Unterdecke (mit mehreren Lagen Gipskarton) auf schallentkoppelten Direktschwingabhängern ohne Abdichtung zum Rand



Abbildung 7: Angebrachter Beschleunigungssensor auf der Empfängerseite (Unterdecke)

Die Berechnung der Federsteifigkeit der punktförmigen Abhängesysteme (siehe Kapitel 2.1.1.4 auf Seite 18) wird nach Formel 1 (Schödel 2018; Hierl 2024) berechnet.

$$D = 4\pi^2 m f_0^2 \quad \text{Formel 1}$$

D = Federsteifigkeit des punktförmigen Abhängers in MN/m

m = Abgehängte Masse je Abhänger in kg

f₀ = ist die gemessene Resonanzfrequenz des Systems in Hz

Die Bestimmung der Federsteifigkeit der linienförmigen Abhängesysteme wird nach Formel 2 (Saarinen et al. 2024) berechnet. Folgendes ist zu beachten:

- Besteht der Messaufbau aus zwei gleichlangen linienförmigen Verbindungsmitteln mit der Länge L. Dann ergibt sich aus beiden Verbindungsmitteln eine Gesamtlänge von 2L für das System.

$$D' = \frac{\pi^2 m_g f_0^2}{L} \quad \text{Formel 2}$$

D' = Federsteifigkeit des linienförmigen Abhängers in MN/m²

m_g = gesamte abgehängte Masse in kg

f₀ = ist die gemessene Resonanzfrequenz des Systems in Hz

L = Länge des linienförmigen Abhängers in m

2.1.2 Messungen an der TU Wien

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen hatten das Ziel, den grundlegenden Ansatz weiterzuentwickeln, die Resonanzfrequenz von Deckensystemen durch die Analyse der Phasendifferenz zwischen Messpunkten an der Ober- und Unterseite der Decke zu bestimmen. Dabei wurde besonderer Wert auf die Validierung der numerischen Modelle sowie die Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren wie Masseverhältnisse, Dämpfungseigenschaften und dynamische Steifigkeiten gelegt, um eine möglichst genaue und belastbare Methodik zur Bestimmung der Resonanzfrequenz zu entwickeln.

2.1.2.1 Kleinversuche

Das Ziel der durchgeführten Untersuchung im Rahmen eines Kleinversuchs besteht darin, ein tiefergehendes Verständnis des physikalischen Systems zu erlangen und die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf das erwartete Messergebnis bei der Bestimmung der Resonanzfrequenz eines Masse-Feder-Masse-Systems zu analysieren. Dabei sollen

insbesondere die Wechselwirkungen zwischen den Massen, der Federsteifigkeit und der Dämpfungseigenschaften der Zwischenschicht im Detail untersucht werden, um deren Auswirkungen auf die Präzision und Zuverlässigkeit der Resonanzfrequenzmessung zu bewerten. Diese Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die Genauigkeit der Messverfahren zu verbessern und mögliche Fehlerquellen zu identifizieren, um so eine fundierte Grundlage für die weitere Forschung und praktische Anwendungen zu schaffen.

Messaufbau

Auf einer von Schwingung entkoppelter Unterlage wurde wie in Abbildung 8 ein Feder-Masse-Feder-Masse System aufgebaut, das ein von den Biegeformen der Platten unbeeinflusstes System im Bereich der Masse-Feder-Masse-Resonanz einer auf Elastomeren entkoppelten Decke mit schwimmendem Estrich entsprechen soll. Als Massen wurden Betonblöcke mit einer Abmessung von 25 cm x 25 cm x 7 cm verwendet. Als elastische Zwischenschicht wurden unterschiedliche Materialien, wie sie üblicherweise als Trittschalldämmung eingesetzt werden, verwendet.



Abbildung 8: Messaufbau bestehend aus insgesamt drei Betonblöcken (25 cm x 25 cm x 7 cm) einer elastischen Zwischenschicht bestehend aus unterschiedlichen Trittschalldämmplatten und einem Auflager aus Elastomer (3 x 12,5 mm) (links) Variation an Materialien die als elastische Zwischenschicht eingesetzt wurden (rechts)

Aus den verfügbaren Materialien wurden verschiedene Kombinationen von Massen und elastischen Zwischenschichten untersucht. Tabelle 17 bietet eine Übersicht der gemessenen Variationen des Masse-Feder-Masse-Schwingers.

Tabelle 17: Übersicht über die gemessenen Kombinationen aus Massen und elastischen Zwischenschichten

Masse 1 in kg	Elastische Zwischenschicht 1	Masse 2 in kg	Auflager
8.35	30 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
16.7	30 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
25.05	30 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
8.35	20 mm Steinwolle	8.5	37.5 mm Elastomer
16.7	20 mm Steinwolle	8.5	37.5 mm Elastomer
25.05	20 mm Steinwolle	8.5	37.5 mm Elastomer
8.35	12 mm Steinwolle	8.5	37.5 mm Elastomer
16.7	12 mm Steinwolle	8.5	37.5 mm Elastomer
25.05	12 mm Steinwolle	8.5	37.5 mm Elastomer
8.35	60 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
16.7	60 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
25.05	60 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
8.35	20 mm EPS	8.5	37.5 mm Elastomer
16.7	20 mm EPS	8.5	37.5 mm Elastomer
25.05	20 mm EPS	8.5	37.5 mm Elastomer
8.35	20 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
16.7	20 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
25.05	20 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
8.35	12 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
16.7	12 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer
25.05	12 mm Glaswolle	8.5	37.5 mm Elastomer

Bestimmung der dynamischen Steifigkeiten und Dämpfungskoeffizienten der elastischen Zwischenschichten

Zur rechnerischen Bestimmung der Resonanzfrequenz wurden die dynamischen Steifigkeiten als Eingangsparameter ermittelt, wobei eine Methode verwendet wurde, die sich an die ÖNORM EN 29052-1:1993 anlehnt (siehe Abbildung 9). Hierzu wurde ein Einmassenschwinger aufgebaut, bestehend aus einem Betonblock (Masse) mit den Abmessungen 25 cm x 25 cm x 7 cm und einer elastischen Zwischenschicht (Feder). Die

Anregung des Systems sowie die Messung der resultierenden Kraft erfolgten mittels eines Impedanzhammers.. Die Beschleunigung der Oberfläche an der Oberseite des Betonblocks wurde durch einen Beschleunigungsaufnehmer erfasst. Die gewonnenen Daten zur dynamischen Steifigkeit und des Dämpfungskoeffizienten sind in Tabelle 18 zusammengefasst. Dieser Dämpfungskoeffizient wird in den späteren Simulationen als Parameter für einen mechanischen translatorischen Dämpfer verwendet, der auf dem Prinzip der viskosen Dämpfung basiert. Die viskose Dämpfung beschreibt die Fähigkeit eines Systems, Energie durch die Relativbewegung zweier Komponenten zu dissipieren, indem eine Kraft erzeugt wird, die proportional zur Relativgeschwindigkeit der Bewegung ist. Der Wertebereich der gemessenen Materialien umfasst bei der dynamischen Steifigkeit somit $2,74 \text{ MN/m}^3 - 15,3 \text{ MN/m}^3$ und beim Dämpfungskoeffizienten von $537 \text{ MN/m}^3 - 1383 \text{ MN/m}^3$.



Abbildung 9: An das Messverfahren der ÖNORM EN 29052-1:1993 angelehnte Versuchsaufbau zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit und des Dämpfungskoeffizienten der elastischen Zwischenschichten als Trittschalldämmung

Tabelle 18: Übersicht über die gemessenen dynamischen Steifigkeiten und Dämpfungskoeffizienten der untersuchten Trittschalldämmplatten

Material	Dicke in mm	Dynamische Steifigkeit s in MN/m^3	Dämpfungskoeffizient c in $\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s})$
Glaswolle	30	9.05	691
Steinwolle	20	2.74	537
Steinwolle	12	11.5	538
Glaswolle	60	4.8	384
EPS	20	9	1153
Glaswolle	20	7	768
Glaswolle	12	4.12	461
Elastomer	37.5	15.3	1383

Abbildung 10 veranschaulicht beispielhaft die aus dem beschriebenen Messaufbau gewonnenen Daten. Dargestellt ist der frequenzabhängige Amplitudenverlauf des Beschleunigungssignals an der Oberseite des Betonblocks. Wie in der ÖNORM EN 29052-1:1993 beschrieben, wurde aus der Amplitudenspitze und den spezifischen Systemparametern die dynamische Steifigkeit des untersuchten Systems berechnet. Der Dämpfungskoeffizient wurde durch die Analyse der Spreizung der Amplitudenverlaufskurve bei halber Amplitudenspitze ermittelt. Diese Methode ermöglicht eine Bestimmung der Dämpfungseigenschaften in Abhängigkeit der gewählten FFT-Auflösung (0.73Hz), die für die Charakterisierung des Schwingungsverhaltens essenziell sind.

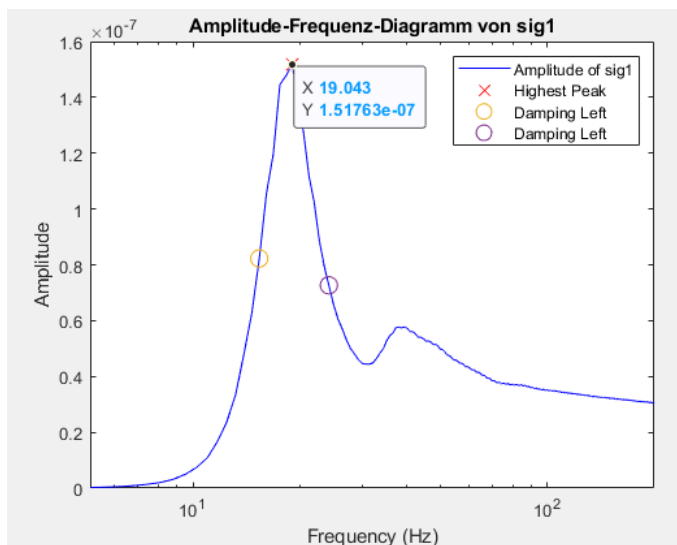


Abbildung 10: Beispielhaftes Messergebnis für die in Abschnitt 2.1.2.1 beschriebenen Messungen zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit und des Dämpfungskoeffizienten einer 30 mm starken Trittschalldämmplatte aus Glasfaser

Ergebnisse - Einfluss Dämpfung

In Abbildung 11 sind das Kreuzleistungsspektrum (Amplitude und Phase) zwischen den beiden Beschleunigungssignalen an Masse 1 und Masse 2 sowie das frequenzabhängige Spektrum dieser Signale dargestellt. Im Amplitudenverlauf des Kreuzleistungsspektrums sind zwei Peaks erkennbar, die auf das Auftreten von zwei Resonanzeffekten hinweisen. Beim ersten Peak schwingen die beiden Massen in Phase, weshalb kein Phasensprung in der Phase des Kreuzleistungsspektrums zu sehen ist. Beim zweiten Peak hingegen tritt ein Phasensprung auf, da die Massen gegenphasig schwingen. Der für das Projekt relevante Resonanzeffekt zeigt sich in diesem Beispiel bei der zweiten Amplitudenspitze des Kreuzleistungsspektrums und wird in Abbildung 11 als vertikale strichlierte Linie markiert. Durch die Variation der Trittschalldämmplatten mit unterschiedlichen Dämpfungskoeffizienten zeigt sich, dass höhere Dämpfungen zu einer merklichen Abflachung des Phasensprungs im Bereich der Resonanzfrequenz führen. Bei steigender Dämpfung wird der Phasensprung weniger ausgeprägt und verläuft flacher, was die präzise Bestimmung der Resonanzfrequenz erschwert. Zusätzlich wird der Peak im Kreuzleistungsspektrum, das die Beziehung zwischen den Beschleunigungssignalen an der Systemober- und der Systemunterseite beschreibt, bei

höheren Dämpfungskoeffizienten weniger markant. Der Peak wird dabei flacher und breiter. Diese Verbreiterung und Abflachung des Peaks machen es schwieriger, die Resonanzfrequenz eindeutig zu identifizieren. Die zunehmende Dämpfung verringert nicht nur die Höhe des Peaks der Amplitude im Kreuzleistungsspektrum, sondern beeinflusst auch die Bandbreite des Phasensprungs in der Phasendifferenzmessung, wodurch die Interpretation und Identifikation der Resonanzfrequenz weiter erschwert wird.

Abbildung 11 zeigt dabei den Vergleich der Messergebnisse von gemessenen Varianten mit unterschiedlichen Trittschalldämmungen.

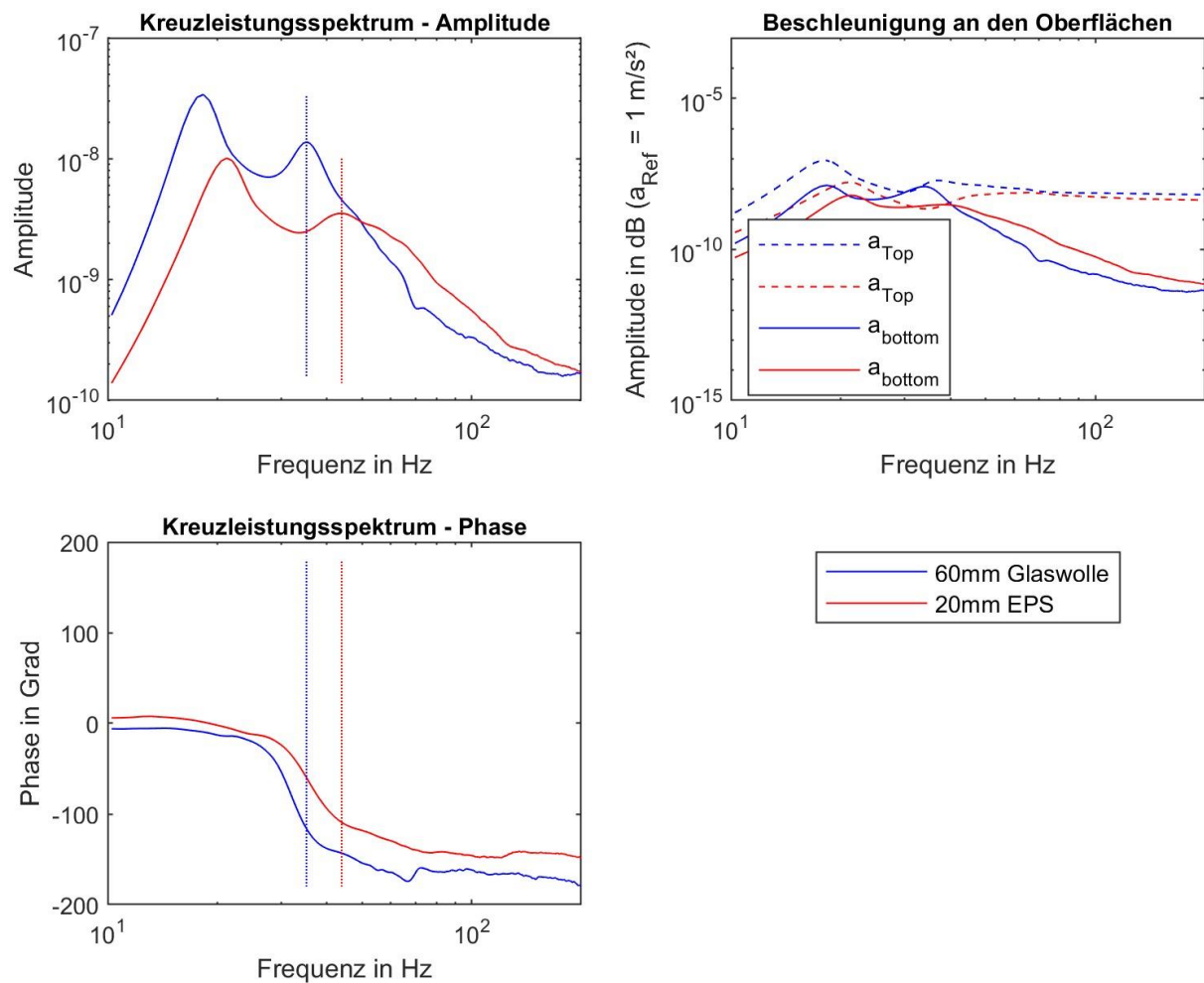


Abbildung 11: Messergebnis für den in Abbildung 8 gezeigten Messaufbau mit einem Massenverhältnis von $m_1/m_2 = 0.5$ und unterschiedlichen elastischen Zwischenschichten (60 mm Glaswolle, 20 mm EPS)

Ergebnisse - Einfluss Masse

Wie in Abbildung 12 dargestellt hat ebenso wie die Dämpfung auch das Masseverhältnis der beiden Massen im Masse-Feder-Masse-System einen signifikanten Einfluss auf das Schwingungsverhalten sowie auf die Beziehung zwischen Phasendifferenz und Amplitude des Kreuzleistungsspektrums der Messsignale an der Systemober- und Systemunterseite. Eine Änderung des Masseverhältnisses wirkt sich nicht nur auf die Resonanzfrequenz aus, sondern

beeinflusst auch den frequenzabhängigen Verlauf der Phasendifferenz. Bei der Variation des Masseverhältnisses wird beobachtet, dass die Verschiebung zwischen einer Phasendifferenz von 90° und der tatsächlichen Lage (unter der Annahme das diese bei der Amplitudenspitze der Übertragungsfunktion a/a liegt) der Resonanzfrequenz zunimmt, wenn das Masseverhältnis größer wird. Diese Verschiebung bedeutet, dass die Resonanzfrequenz weiter von der Frequenz entfernt ist, bei der die Phasendifferenz 90° annimmt. Daher ist es bei der Auswertung der Messdaten und der Bestimmung der Resonanzfrequenz wichtig, diese Veränderungen im Masseverhältnis zu berücksichtigen. Eine präzise Bestimmung der Resonanzfrequenz erfordert ein angepasstes Verständnis der Auswirkungen des Masseverhältnisses auf das Kreuzleistungsspektrum, um mögliche Verschiebungen korrekt einzuordnen und die Resonanzfrequenz zu identifizieren.

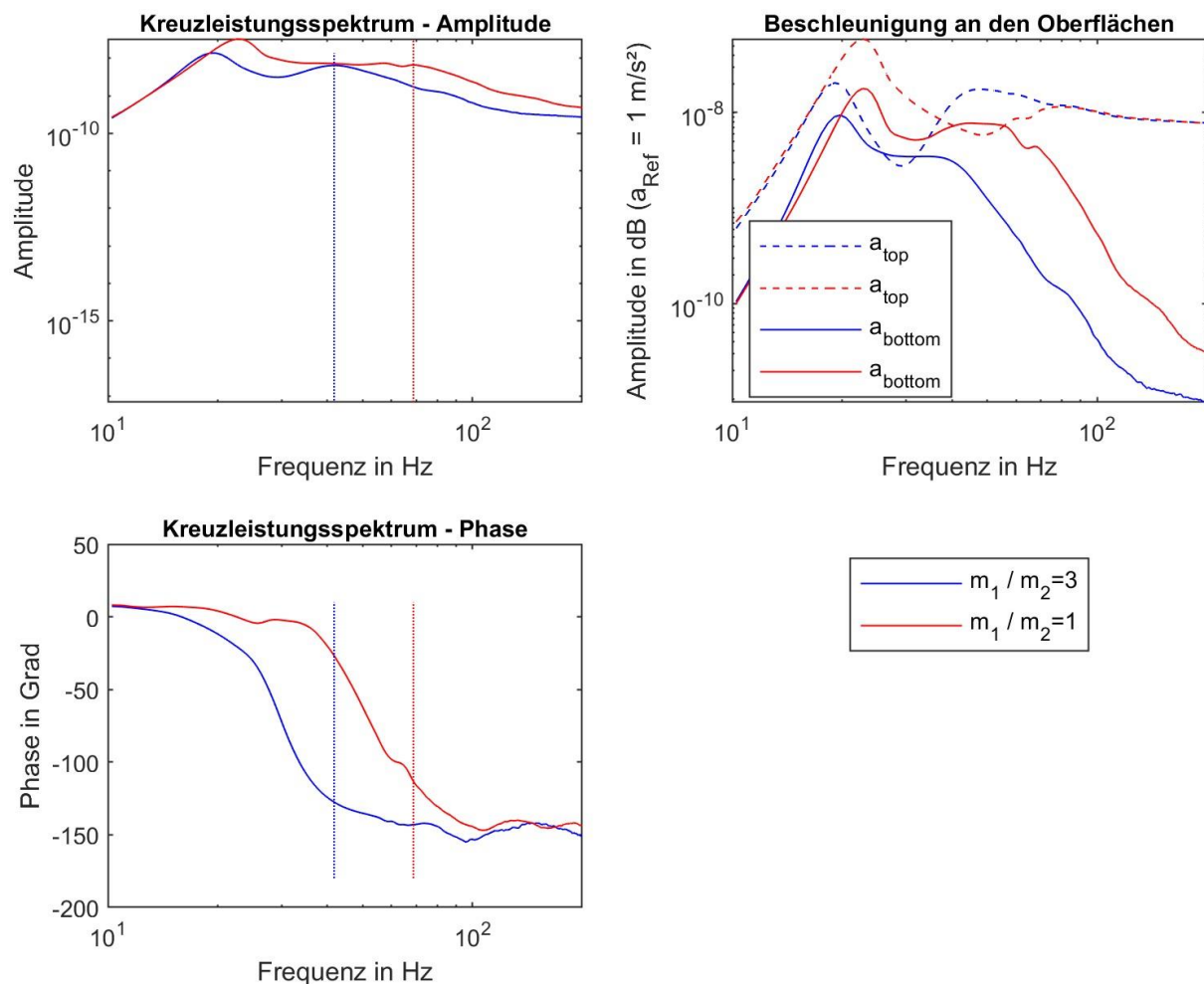


Abbildung 12: Messergebnis für den in Abbildung 8 gezeigten Messaufbau mit unterschiedlichen Massen (1 Masse $m_1 = 8.25 \text{ kg}$ und 3 Platten $m_2 = 16.5 \text{ kg}$) als „Estrich“ mit 30 mm Glaswolle als Trittschalldämmplatte

Ergebnisse - Einfluss dynamische Steifigkeit

Wie in Abbildung 13 zu erkennen ist, zeigt die dynamische Steifigkeit, im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Parametern wie dem Masseverhältnis und der Dämpfung, keinen signifikanten Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Phasendifferenz und Amplitude des Kreuzleistungsspektrums. Während das Masseverhältnis und die Dämpfung deutliche Effekte auf die Verschiebung der Resonanzfrequenz und die Phasendifferenz haben, ist die dynamische Steifigkeit in diesem Kontext weniger einflussreich.

Eine geringe dynamische Steifigkeit führt, wie in Abbildung 13 dargestellt, zu einer Reduktion der Resonanzfrequenz des Systems. Diese Verringerung der Resonanzfrequenz tritt aufgrund der veränderten Steifigkeit auf, hat jedoch keinen wesentlichen Effekt auf die relative Verschiebung der Phasendifferenz im Vergleich zur Amplitudenspitze im Kreuzleistungsspektrum. Diese Erkenntnis unterstreicht, dass die dynamische Steifigkeit primär die Lage der Resonanzfrequenz beeinflusst ohne dabei die relative Lagen zwischen Phasensprung und Amplitudenspitze zu verschieben.

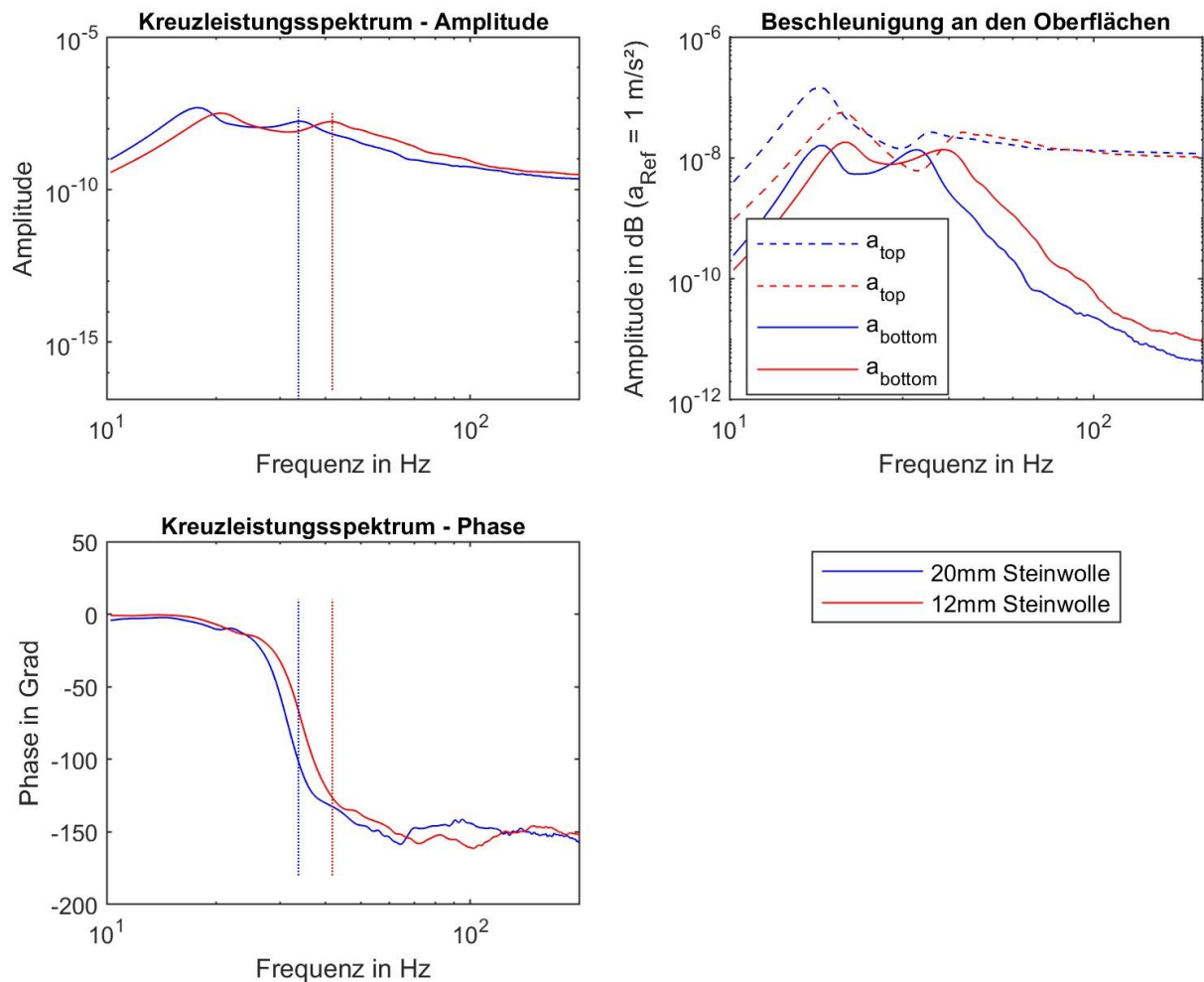


Abbildung 13: Messergebnis für den in Abbildung 8gezeigten Messaufbau mit einem Massenverhältnis von $m_1/m_2 = 2$ und unterschiedlichen elastischen Zwischenschichten (20 mm Steinwolle, 12 mm Steinwolle)

Ergebnisse - Beschleunigung / Beschleunigung vs Kraft / Beschleunigung

Die Phasendifferenz zwischen den aufgezeichneten Signalen der Kraft an der Systemoberseite und der Beschleunigung an der Systemunterseite unterscheidet sich grundlegend von der Phasendifferenz zwischen den Beschleunigungen an der Systemober- und Systemunterseite. Dieser Vergleich wird in Abbildung 14 veranschaulicht.

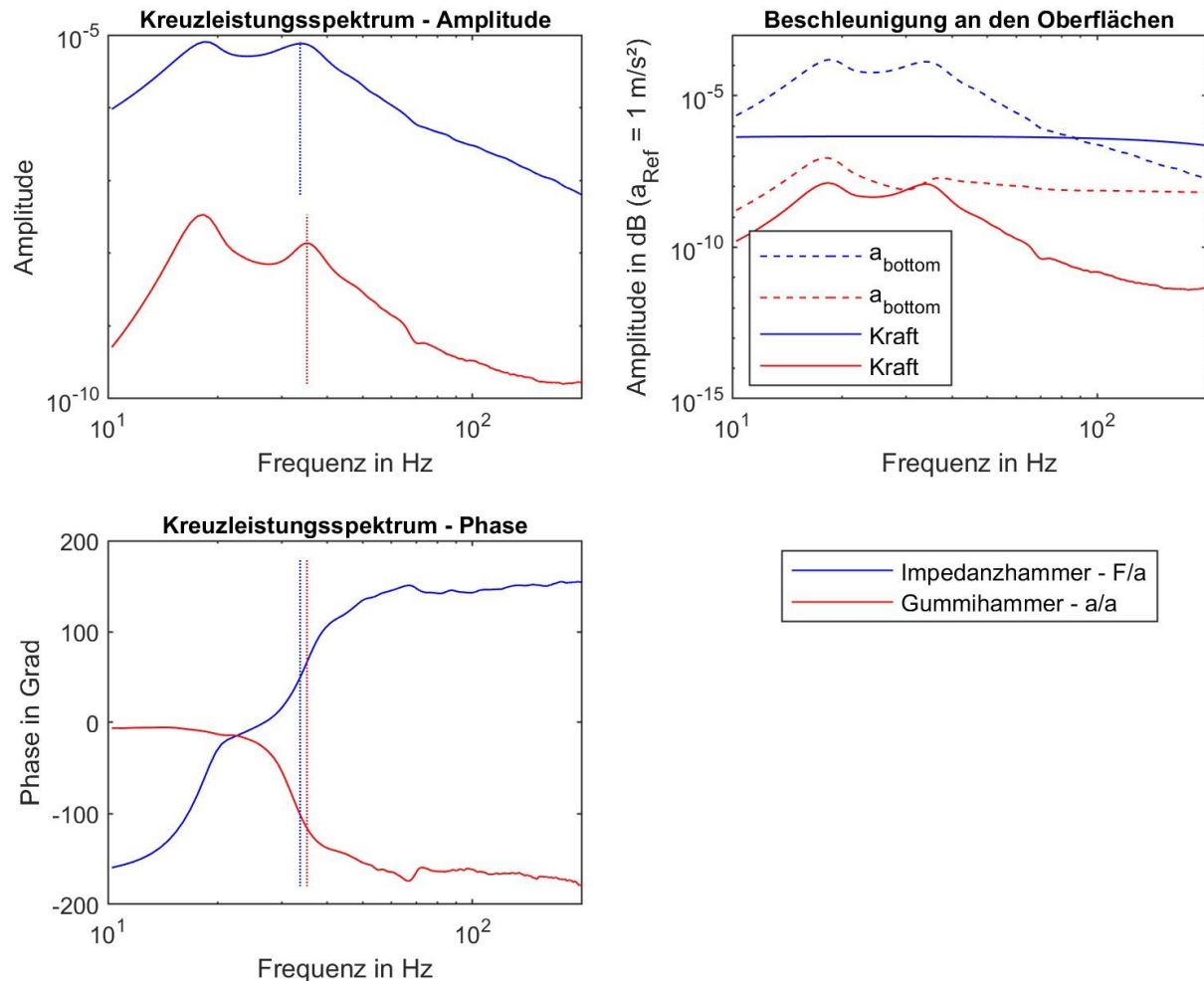


Abbildung 14: Messergebnis für den in Abbildung 8gezeigten Messaufbau mit einem Massenverhältnis von $m_1/m_2 = 2$ und unterschiedlichen elastischen Zwischenschichten (20 mm Steinwolle, 12 mm Steinwolle)

Die erste Eigenfrequenz des Systems (abhängig von der Auflagerung) beeinflusst die Phasendifferenz zwischen den beiden Beschleunigungssignalen nicht, da beide Massen bei etwa 18 Hz in Phase schwingen. In der Darstellung der Phasendifferenz zwischen den gemessenen Kraft- und Beschleunigungssignalen von Masse 2 ist zusätzlich zum Phasensprung bei 18Hz bei der zweiten Resonanzfrequenz bei ca. 37Hz ein weiteres Resonanzphänomen erkennbar. Insgesamt gibt es zwei Phasensprünge. Der erste Phasensprung, der im Kreuzleistungsspektrum der Beschleunigungssignale von Masse 1 und Masse 2 nicht sichtbar ist, tritt auf, wenn beide Massen gleichphasig zueinander und relativ zum Fußpunkt des Systems schwingen. Beim zweiten Phasensprung schwingen die Massen

gegenphasig, womit auch bei der Betrachtung des Kreuzleistungsspektrum der beiden Beschleunigungssignalen einen Phasensprung erkennbar ist.

Dies kann in der Auswertung problematisch sein, insbesondere wenn die Auflagersituation unbekannt ist und sowohl die Steifigkeit als auch die Dämpfung der Lager nicht genau bestimmt werden können. In solchen Fällen wird die Interpretation der Messergebnisse erschwert, da der Verlauf der Phasendifferenz stark von den Eigenschaften der Auflagerung beeinflusst wird. Dies führt zu einer komplexeren Analyse, da die Phasensprünge nicht nur durch die Masse-Feder-Masse-Resonanz des schwimmenden Estrichs, sondern auch durch die Interaktion des gesamten Systems mit seinen Auflagern bestimmt werden. Die Unterschiede in der auf Basis der zweiten Amplitudenspitze der jeweiligen Übertragungsfunktion a/a oder F/a erhaltenen Ergebnisse, können durch die erneuten Messdurchführungen (Variierende Anregungskräfte, erneuter Aufbau, etc.) begründet sein.

Zusammenfassung:

- Im Rahmen des Kleinversuchs lässt sich die Resonanzfrequenz des Systems anhand der Amplitudenspitze in dem Kreuzleistungsspektrums zwischen den Beschleunigungen auf der Ober- und Unterseite des abstrahierten „Deckensystems“ bestimmen. Dieser Ansatz ist besonders effektiv, da die typischen Störungen, die durch die Biegeformen der Platten verursacht werden könnten, in diesem Versuch nicht vorhanden sind. Dies ermöglicht eine Identifikation der Resonanzfrequenz, da die Übertragungsfunktion eine deutliche Amplitudenspitze zeigt, die direkt auf die Resonanz hinweist.
- Die Phasendifferenz zwischen den Beschleunigungen auf der Ober- und Unterseite des „Deckensystems“ wird hauptsächlich von zwei Faktoren beeinflusst: der Dämpfung der elastischen Zwischenschicht und dem Massenverhältnis der beiden Massen im System. In einem idealen, ungedämpften System würde die Phasendifferenz im Bereich der Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenz bei maximal 180° liegen. Mit zunehmendem Dämpfungskoeffizienten der elastischen Zwischenschicht verringert sich diese Phasendifferenz jedoch, was auf die dissipativen Eigenschaften der Schicht zurückzuführen ist. Bei der Bestimmung der Übertragungsfunktion mithilfe eines Impedanzhammers, also durch die Messung des Kreuzleistungsspektrums von den Signalen Kraft und Beschleunigung, beträgt die Phasendifferenz bei der Resonanzfrequenz 90° und nimmt mit steigender Dämpfung der elastischen Zwischenschicht weiter ab. Eine erhöhte Dämpfung sowie ein deutlich von 1 abweichendes Massenverhältnis führen ebenfalls zu einer Verringerung dieser Phasendifferenz.
- Bei hohen Dämpfungskoeffizienten der elastischen Zwischenschicht zeigt sich der Peak der Amplitude des Kreuzleistungsspektrums nicht mehr als scharfer, deutlicher Ausschlag, sondern wird stark abgeflacht und verbreitert. Diese Veränderung

erschwert die eindeutige und automatische Identifikation der Resonanzfrequenz erheblich, da das Signal, das die Resonanzfrequenz anzeigt, weniger klar und prägnant ist. Die breitere und flachere Spitze erschwert es, einen eindeutigen Punkt der maximalen Amplitude zu identifizieren, was für die Messgenauigkeit sein kann.

- Darüber hinaus führt eine hohe Dämpfung dazu, dass die Phasendifferenz langsamer ansteigt, bis sie das erwartete Maximum erreicht. Dies führt zu einer Verschiebung zwischen der maximalen Phasendifferenz und der Amplitudenspitze des Kreuzleistungsspektrums. In solchen Fällen kann die Phasendifferenz allein nur eingeschränkt zur genauen Bestimmung der Resonanzfrequenz herangezogen werden, insbesondere wenn der Dämpfungskoeffizient der elastischen Zwischenschicht unbekannt ist. Sie kann zwar einen Frequenzbereich eingrenzen, in dem die Resonanzfrequenz liegt, jedoch ist eine eindeutige Identifikation der Resonanzfrequenz unter diesen Umständen nur über die Spitze der Amplitude des Kreuzleistungsspektrums Kraft/Beschleunigung oder Beschleunigung/Beschleunigung möglich. In Abhängigkeit von dem Dämpfungskoeffizienten zeigen die Übertragungsfunktionen F/a und a/a Unterschiede in den Frequenzen der auftretenden Amplitudenspitzen. Welche dieser Frequenzen der tatsächlichen Resonanzfrequenz im Kontext der Formulierungen der ÖNORM B 8115-5:2021 des Systems entspricht, lässt sich auf Basis der vorliegenden Ergebnisse derzeit nicht sagen. Die Unterschiede betragen in den gegenständlichen Untersuchungen 4 Hz - 7 Hz und nehmen mit zunehmenden Dämpfungskoeffizienten zu. Die präzise Erfassung der Resonanzfrequenz erfordert daher eine sorgfältige Analyse des Kreuzleistungsspektrums, um die Dämpfungseinflüsse korrekt zu berücksichtigen und eine genaue Bestimmung der Frequenz sicherzustellen.

2.1.2.2 Numerisches Rechenmodell - Zweimassenschwinger

Um ein tieferes Verständnis des Verhaltens des Systems zu gewinnen, wurde auf Grundlage der Messergebnisse aus 2.1.2.1 ein Modell des Feder-Masse-Feder-Masse-Systems in der Softwareumgebung „Simscape“ erstellt (siehe Abbildung 15). Dieses Modell ermöglicht es, parametergestützte Simulationen durchzuführen, die auf den ermittelten Materialkennwerten typischer Trittschalldämmplatten basieren. Durch diese Simulationen konnten die zu erwartenden Messergebnisse unter verschiedenen Bedingungen vorhergesagt werden. Die Analyse der Simulationsergebnisse diente der Entwicklung von Regeln zur Identifikation der Resonanzfrequenz des im schwimmenden Estrich als Masse-Feder-Systems. Diese Regeln tragen dazu bei, die Resonanzfrequenz zu bestimmen und ermöglichen eine genauere Vorhersage des akustischen Verhaltens, insbesondere in Bezug auf Trittschall und Schwingungen. Durch diese modellbasierte Herangehensweise konnte der Messprozess zur Bestimmung der Resonanzfrequenzbestimmung verbessert werden.

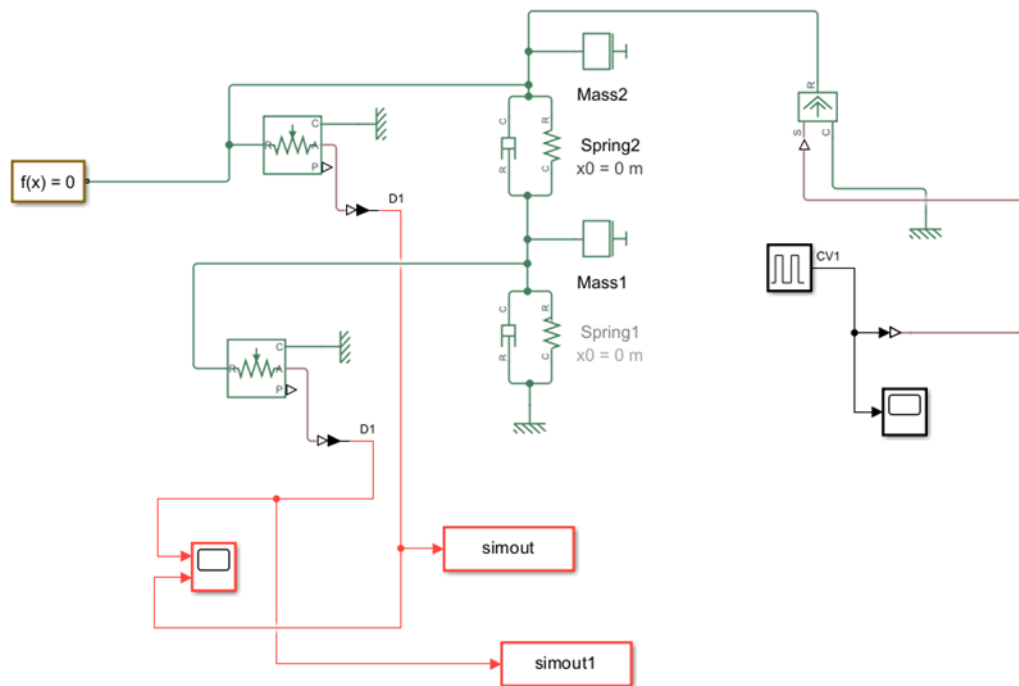


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Modells zur Abbildung des Feder-Masse-Feder-Masse Systems in der Softwareumgebung „Matlab-Simscape“

Die Simulation wird im Zeitbereich durchgeführt, wobei das System, wie in Abbildung 8 dargestellt, durch einen kurzen Impuls mit einer Pulsweite von 0,1 Sekunden angeregt wird. Diese Anregung führt zu einer Verschiebung der beiden Massen im System, deren dynamisches Verhalten in der Zeitdomäne detailliert untersucht wird. Im Anschluss daran werden die resultierenden Zeitverläufe der Verschiebungen einer Fourier-Transformation unterzogen, um die Daten in den Frequenzbereich zu übertragen. Diese Transformation ermöglicht es, die Frequenzinhalte der Schwingungen zu analysieren und die charakteristischen Resonanzfrequenzen des Systems zu identifizieren. Die so gewonnenen Simulationsergebnisse werden anschließend mit den experimentellen Daten aus den durchgeführten Versuchen (siehe Abschnitt 2.1.2.1) verglichen. Dieser Vergleich dient der Validierung des Modells und stellt sicher, dass die Simulation realistische und verlässliche Ergebnisse liefert, die mit den tatsächlichen physikalischen Messungen übereinstimmen. Durch diesen Prozess wird die Genauigkeit der Simulation überprüft und das Modell weiter verfeinert, um eine präzise Vorhersage des Verhaltens des Masse-Feder-Systems unter verschiedenen Bedingungen zu gewährleisten.

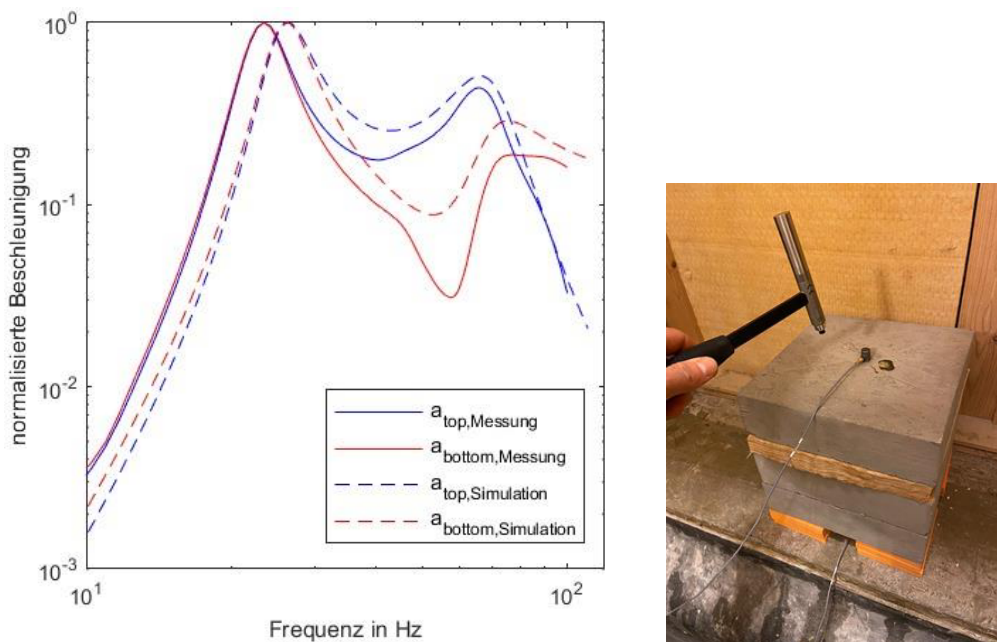


Abbildung 16: 1 Masse (8.5 kg), 30 mm Glaswolle, 2 Massen (16.7 kg) auf 37.5 mm Elastomer

Abbildung 16 zeigt den Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen und den gemessenen Daten, der über den gesamten betrachteten Frequenzbereich eine weitgehend zufriedenstellende Übereinstimmung aufweist. Dabei ist jedoch zu erkennen, dass die Lage der ersten Resonanzfrequenz in der Simulation leicht überschätzt wurde. Diese Abweichung könnte auf eine Unschärfe bei der messtechnischen Bestimmung der dynamischen Steifigkeit der Elastomerlager zurückzuführen sein, was die Genauigkeit der Simulation beeinflusst. Darüber hinaus weist das Simulationsmodell eine Unterschätzung der Dämpfung bei der zweiten Resonanzfrequenz auf. Dies deutet darauf hin, dass das Modell möglicherweise nicht alle relevanten Dämpfungsmechanismen vollständig erfasst oder dass die Annahmen über die Dämpfungseigenschaften des Materials in diesem Frequenzbereich nicht ausreichend präzise sind.

Der Vergleich liefert Erkenntnisse zur Modellvalidierung und zeigt, dass das Simulationsmodell trotz einiger Abweichungen eine zuverlässige Grundlage für die Analyse des Schwingungsverhaltens darstellt.

Ergebnisse:

Zur Vereinfachung der Interpretation der messtechnisch gewonnenen Phasenverläufe wurden auf Basis des validierten Simscapes-Modells Untersuchungen durchgeführt, um die Verschiebung zwischen einer 90° Phasendifferenz und der Amplitudenspitze im Kreuzleistungsspektrum der jeweiligen Messgrößen zu bestimmen. In diesen Untersuchungen wurden das Masseverhältnis (0,5-2) und der Dämpfungskoeffizient (100-900 N/(m·s)) variiert.

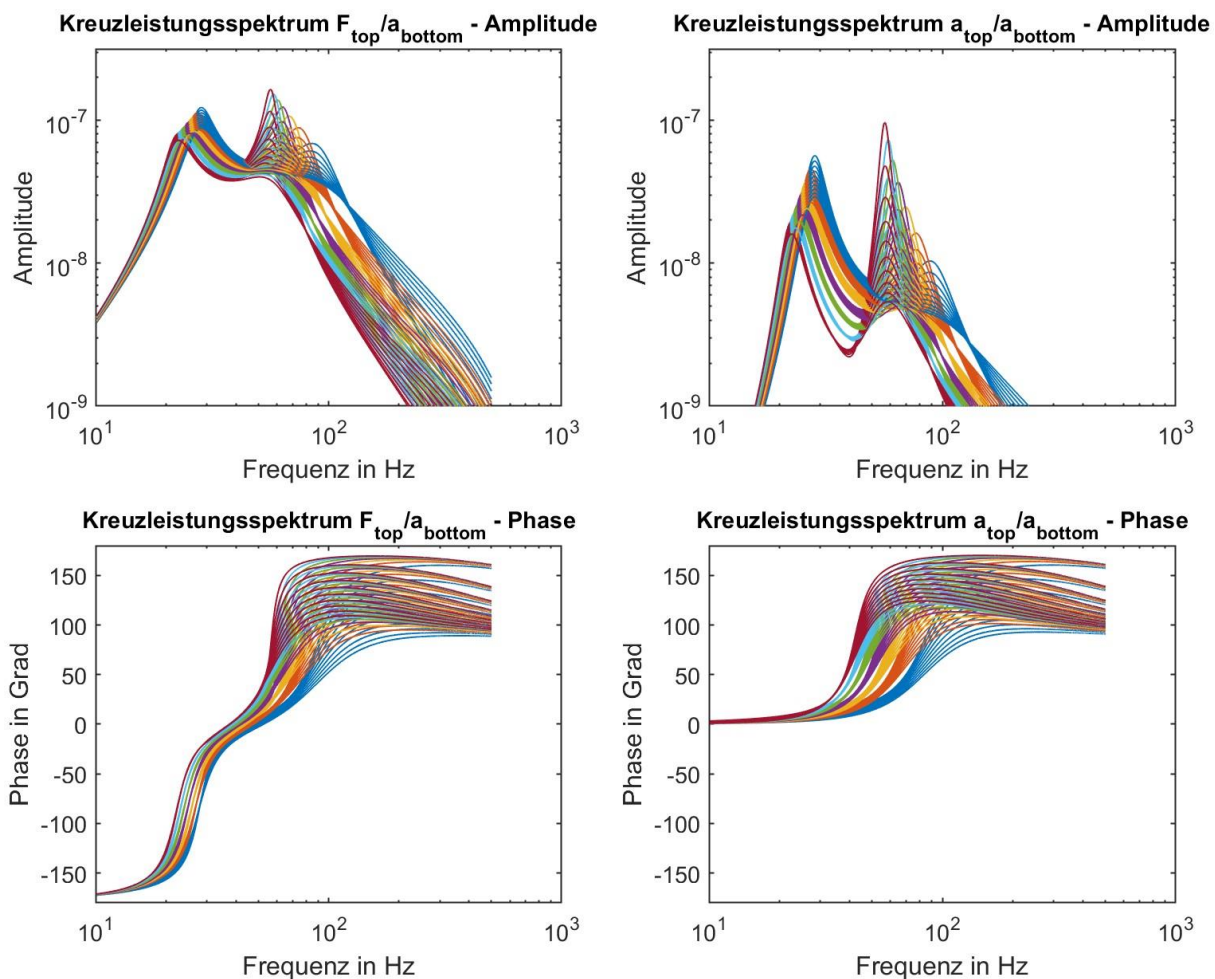


Abbildung 17: Ergebnisse aus der Parameterstudie (Masseverhältnis (0,5-2) und der Dämpfungskoeffizient der elastischen Zwischenschicht (100-900 N/(m·s), $s_{\text{Auflager}} = 8.7 \text{ MN/m}^3$, $s_{\text{Zwischenschicht}} = 10.1 \text{ MN/m}^3$) des auf Elastomerpads aufgelagerten Zweimasenschwingers mit elastischer Zwischenschicht. Innerhalb einer Farbgruppe werden die Ergebnisse mit identischem Massenverhältnis, jedoch variierendem Dämpfungskoeffizienten, dargestellt.

Die daraus resultierenden Verschiebungen wurden in Contourplots (siehe Abbildung 18) für die Kreuzleistungsspektren von Kraft/Beschleunigung sowie Beschleunigung/Beschleunigung dargestellt, um einen umfassenden Überblick über das Verhalten der Systeme unter verschiedenen Bedingungen zu geben. Die Ergebnisse dieser Parameterstudie sind in Abbildung 17 dargestellt und bieten Einblicke in die komplexen Zusammenhänge zwischen den untersuchten Variablen und den resultierenden Phasenverläufen.

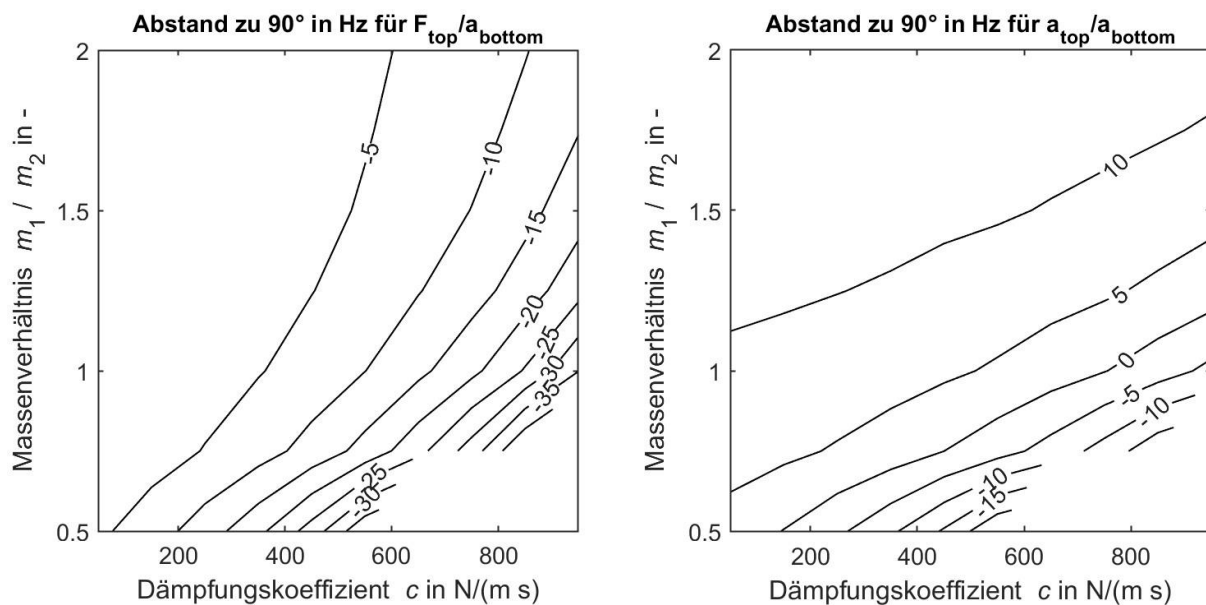


Abbildung 18: Contourplots zu Darstellung Verschiebung zwischen einer 90° Phasendifferenz und der Amplitudenspitze im Kreuzleistungsspektrum für die Messgrößen Kraft gegen Beschleunigung an der Systemunterseite (links) und Beschleunigung an der Systemoberseite gegen Beschleunigung an der Systemunterseite (rechts)

Eignung von Entkopplung zur Bestimmung von f_R

Zur Diskussion der Eignung einkanaliger Messsysteme und der ausschließlichen Betrachtung frequenzabhängiger Amplitudenverläufe wurden mithilfe des validierten Simscape-Modells die Amplitudenverläufe der Beschleunigungen an der Ober- und Unterseite des Systems in Abhängigkeit von der Dämpfung der elastischen Zwischenschicht, also der Trittschalldämmplatte, untersucht. Die in Abbildung 19 dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Pegelspitzen im Bereich der Masse-Feder-Masse-Resonanzfrequenz der Beschleunigungen an der Systemoberseite (Masse 1) und an der Systemunterseite (Masse 2) nicht bei der gleichen Frequenz auftreten. Diese Verschiebung der Resonanzfrequenz ist nicht nur durch das Masseverhältnis der beiden Massen bedingt, sondern auch stark von der Dämpfung der Trittschalldämmung abhängig (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Die dazugehörigen farbigen vertikalen Linien verdeutlichen das beginnende Auseinanderdriften des Schwingungsverhaltens der beiden Massen. Dieser Punkt im Frequenzspektrum, an dem die Divergenz beginnt, variiert abhängig von der Dämpfung, was die Bedeutung der Dämpfungseigenschaften für das gesamte Schwingungsverhalten des Systems unterstreicht.

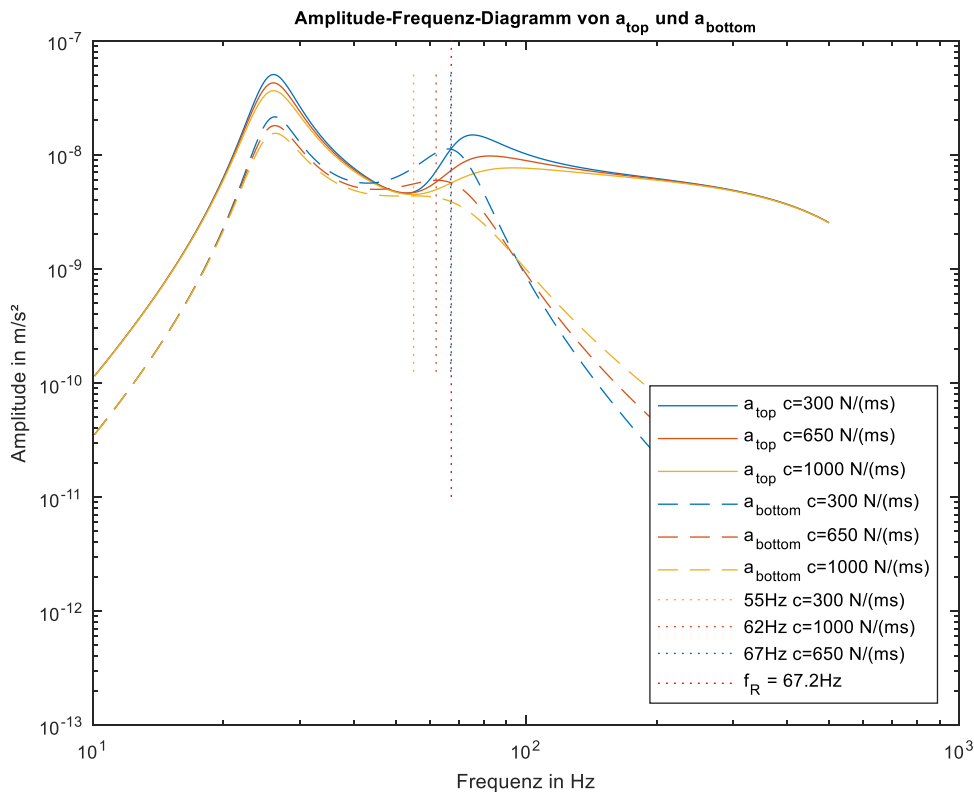


Abbildung 19: Darstellung der frequenzabhängigen Beschleunigungen an der Systemoberseite a_{top} und an der Systemunterseite a_{bottom} in Abhängigkeit des Dämpfungskoeffizienten der elastischen Zwischenschicht ($m_1= 8.35$ kg, $m_2=8.35$ kg, $s_1=8.7$ MN/m³, $s_2=10.1$ MN/m³) und den vertikalen Linien als Verdeutlichung der beginnenden Divergenz von a_{top} zu a_{bottom} im Vergleich zur berechneten Resonanzfrequenz $f_R=67.2$ Hz

Die Analyse der Amplitudenverläufe allein führt daher zu unterschiedlichen Ergebnissen je nach den spezifischen Dämpfungseigenschaften des Systems. Dies bedeutet, dass eine einfache Betrachtung des Auftretens der Pegelspitzen der einzelnen Spektren der Beschleunigungen an den Bauteiloberflächen nicht ausreicht, um die tatsächliche Resonanzfrequenz des Systems exakt zu bestimmen. Ein solcher Ansatz kann insbesondere bei Systemen mit unterschiedlichen Dämpfungsgraden zu Fehleinschätzungen führen. Im Vergleich dazu liefert die Analyse des Kreuzleistungsspektrums, das die Beziehung zwischen den Schnellen an der Ober- und Unterseite des Systems beschreibt, eine robustere Methode zur Bestimmung der Resonanzfrequenz. Das Kreuzleistungsspektrum berücksichtigt die Phasenbeziehung und die gemeinsame Energieverteilung der beiden Signale über das Frequenzspektrum hinweg, was zu einer genaueren und konsistenteren Bestimmung der Resonanzfrequenz führt, unabhängig von den variierenden Dämpfungseigenschaften der Trittschalldämmung.

Zusammenfassend zeigt diese Untersuchung, dass die ausschließliche Betrachtung von frequenzabhängigen Amplitudenverläufen in einkanaligen Messsystemen, insbesondere ohne die Einbeziehung der Phasenbeziehungen, zu ungenauen Ergebnissen führen kann. Die

Verwendung des Kreuzleistungsspektrums stellt eine robustere Methode dar, um die Resonanzfrequenz in komplexen Masse-Feder-Masse-Systemen wie schwimmenden Estrichsystemen zu identifizieren.

2.1.2.3 Numerisches Rechenmodell - Massivholzdecke mit schwimmenden Estrich

Um Anwendungsrichtlinien für die Messprozedur in Bezug auf die optimale Anregungsposition zu entwickeln und die grundsätzliche Eignung der „Phasendifferenz“-Methode zur Bestimmung der Masse-Feder-Masse-Resonanzfrequenz in schwimmenden Estrichsystemen zu bewerten, wurde ein numerisches Modell eines schwimmenden Estrichs auf einer homogenen Deckenkonstruktion (Beton) in einer FEM-Softwareumgebung erstellt.

Im ersten Schritt wurde das Modell so vereinfacht, dass es praktikabel bleibt, aber dennoch die wesentlichen physikalischen Eigenschaften realistisch abbildet. Dazu gehören die Modellierung der Auflagerung als bedämpfte elastische Lagerung sowie die Trittschalldämmung als dünne elastische Schicht, die durch ihre Federsteifigkeit und den Verlustfaktor charakterisiert wird. Um die Gültigkeit dieser Vereinfachungen zu überprüfen, wurden die Simulationsergebnisse mit den experimentellen Daten aus Abschnitt 2.1.2.1 verglichen.

Abbildung 20 zeigt den Vergleich der durch Messung und Simulation ermittelten Oberflächenbeschleunigungen an der Ober- und Unterseite der kleinformigen „Deckenkonstruktion“. Der Vergleich deckt sich über den betrachteten Frequenzbereich hinweg zufriedenstellend, was die Korrektheit der Modellannahmen untermauert. Diese Übereinstimmung bestätigt die Verwendbarkeit des Modells als Grundlage für weiterführende numerische Untersuchungen an Deckenkonstruktionen mit realitätsnahen geometrischen Abmessungen.

Auf Basis dieser validierten Modellierungsansätze werden in den nächsten Schritten spezifische Simulationen durchgeführt, um die Anregungspositionen zu optimieren und die Phasendifferenz-Methode weiter zu verfeinern. Ziel ist es, robuste Anwendungsrichtlinien zu entwickeln, die in der Praxis zur genauen Bestimmung der Resonanzfrequenz in verschiedenen schwimmenden Estrichsystemen verwendet werden können. Diese numerischen Untersuchungen sind entscheidend, um die Messprozedur unter realen Bedingungen zu optimieren und die Zuverlässigkeit der Resonanzfrequenzbestimmung zu gewährleisten.

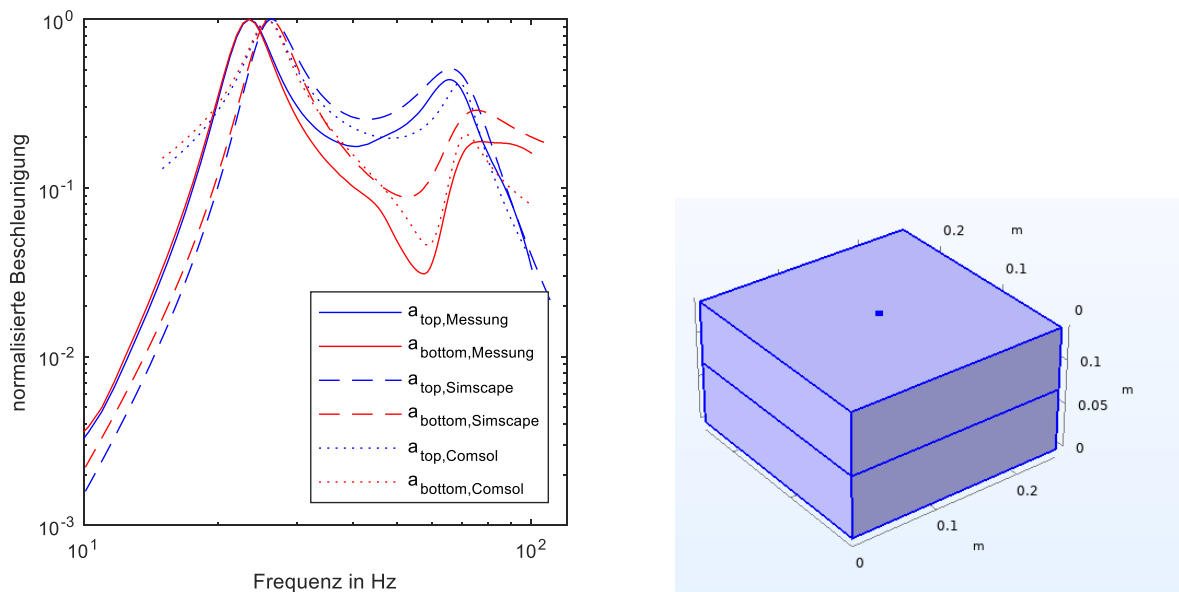


Abbildung 20: Vergleich der durch Messung und Simulation ermittelten Oberflächenbeschleunigungen an der Ober- und Unterseite der kleinformatigen „Deckenkonstruktion“, Masse (8.5 kg), 30 mm Glaswolle 2 Massen (16.7 kg) auf 37.5 mm Elastomer (links) Model des simulierten kleinformatigen Deckensystems (25 cm x 25 cm) in der FEM Softwareumgebung „Comsol Multi Physics 6.2“

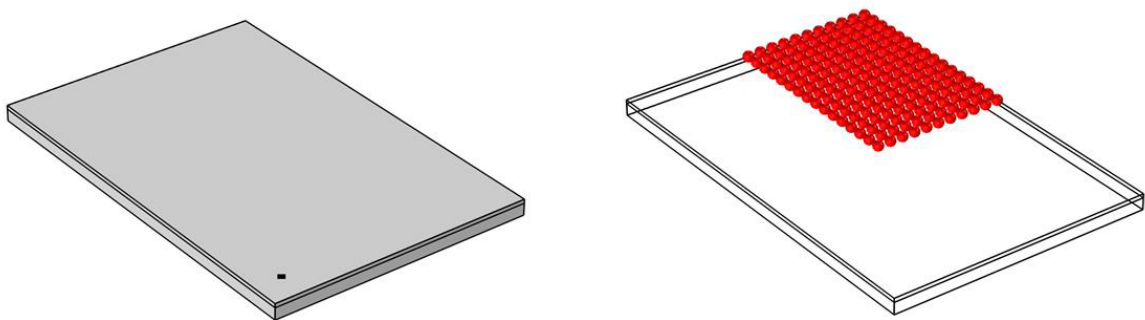


Abbildung 21: Darstellung der Deckenkonstruktion (6m x 4m) mit schwimmendem Estrich (links) Darstellung des Rasters aus Anregungspunkten (20cm x 20cm) auf der Estrichoberseite

Das großformatige Rechenmodell (siehe Abbildung 21) umfasst eine detaillierte Simulation einer Deckenkonstruktion, bestehend aus einem 6 cm dicken Zementestrich ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$), einer Trittschalldämmung mit unterschiedlichen dynamischen Steifigkeiten (5 MN/m^3 , 22 MN/m^3 , 50 MN/m^3 , 91 MN/m^3) und einer 18 cm dicken Betondecke ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$). Das Auflager der Betondecke wurde durch ein elastisches Lager mit einer dynamischen Steifigkeit von 8.7 MN/m^3 und einem isotropen Verlustfaktor von 0.17 abgebildet. Um den Einfluss verschiedener geometrischer Abmessungen auf das Schwingungsverhalten zu analysieren und daraus Erkenntnisse über die optimalen Anregungspositionen zu gewinnen, wurden drei unterschiedliche Grundrisse gewählt: 5 m x 5 m, 6 m x 4 m und 6 m x 3 m.

Im ersten Schritt wurde die Decke in einem Quadranten rasterförmig in Abständen von 20 cm angeregt. Für jede dieser Anregungspositionen wurde das Schwingungsfeld bei der

berechneten Resonanzfrequenz des Estrichsystems durch Berechnung nach ÖNORM B 8115-4 ermittelt. Diese Resonanzfrequenz ist eine zentrale Kenngröße des Masse-Feder-Masse-Systems und bietet wichtige Einblicke in das Schwingungsverhalten unter spezifischen Bedingungen. Anschließend wurde die Phasendifferenz zwischen den komplexen Geschwindigkeitsverteilungen (Schnellen) an der Ober- und Unterseite der Decke berechnet, um das Wechselspiel der beiden Ebenen zu analysieren. Abbildung 22 zeigt exemplarisch die Ergebnisse des Simulationsmodells für die Variante mit den Abmessungen 6 m x 4 m. Hierbei wurde eine Trittschalldämmplatte mit einer dynamischen Steifigkeit von 5 MN/m^3 verwendet, wobei die Resonanzfrequenz des schwimmenden Estrichs bei 35 Hz lag. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die berechnete Phasendifferenz über die gesamte Deckenfläche nicht homogen verteilt ist und im Bereich der Anregungsposition eines ihrer Maxima aufweist. Dies deutet darauf hin, dass die Messung und Anregung idealerweise an der gleichen Position erfolgen sollten, um eine präzise Bestimmung der Resonanzfrequenz zu gewährleisten. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass es aufgrund der Interaktion zwischen den Schwingungsformen des Estrichs und der Betondecke zu Bereichen kommt, in denen die Phasendifferenz signifikant von den erwarteten Maximalwerten abweicht. Solche Abweichungen treten insbesondere in Regionen auf, die weiter von der Anregungsquelle entfernt sind, und weisen auf komplexe Wechselwirkungen innerhalb des Systems hin. Daher ist es entscheidend, die Positionen zu identifizieren, an denen die Phasendifferenz in Abhängigkeit von der Anregungsposition ihr Maximum erreicht.

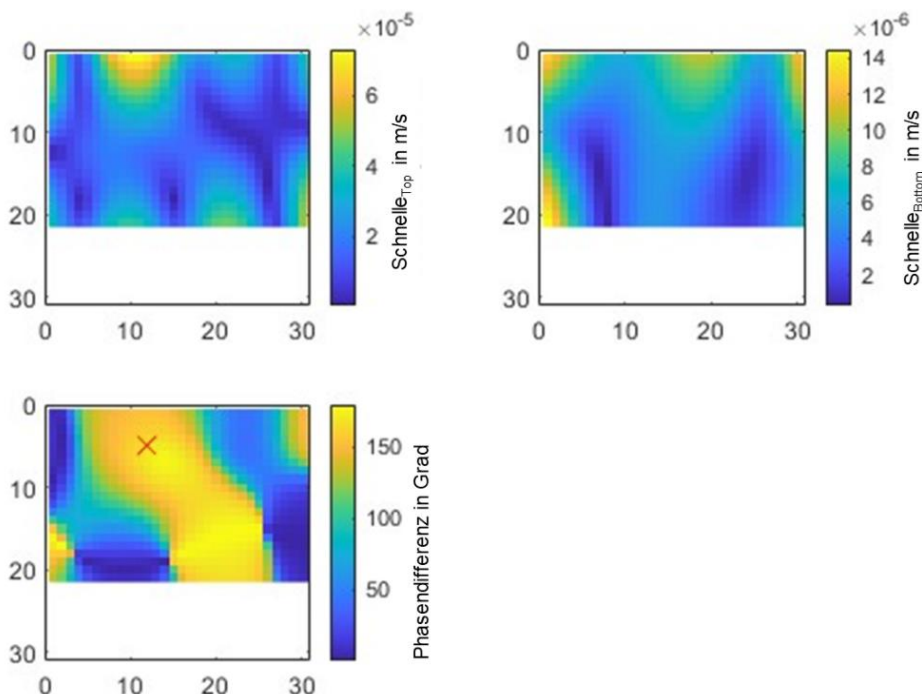


Abbildung 22: Ergebnisauswertung aus der numerischen Simulation eines Deckensystems aus Betondecke (18 cm), schwimmenden Estrichs (6 cm) mit einer Trittschalldämmplatte ($s' = 5 \text{ MN/m}^3$) mit 6 m x 4 m, Schnelleverteilung Estrichoberseite (links oben) Schnelleverteilung an der Deckenunterseite (rechts oben), Phasendifferenz zwischen den Schnellen an der Deckenober- und Deckenunterseite

Um diese Bereiche systematisch zu erfassen, wurde die Phasendifferenz für jeden Anregungspunkt innerhalb eines Radius von 20 cm gemittelt und die Varianz der Phasendifferenz in diesem Bereich berechnet. Diese Methode ermöglicht es, jene Bereiche zu identifizieren, in denen die Phasendifferenz möglichst homogen verteilt ist und klare Maxima gegenüber der restlichen Deckenfläche aufweist. Abbildung 23 zeigt die Ergebnisse dieser Auswertung für das Modell mit den Abmessungen 6 m x 4 m. Die Auswertungen für die anderen geometrischen Varianten sind in Anhang 2 dargestellt.

Es wurde festgestellt, dass sich für die verschiedenen dynamischen Steifigkeiten der Trittschalldämmungen ähnliche Bereiche herausbilden, in denen die Phasendifferenz ein Maximum aufweist und relativ gleichmäßig verteilt ist. Bei höheren dynamischen Steifigkeiten der TDP fällt die Resonanzfrequenz in Frequenzbereiche, in denen bereits eine erhöhte modale Dichte von Estrich und Betondecke vorliegt. Diese Überlagerung führt zu einer stärkeren Interaktion der Moden, was die Ergebnisse zunehmend inhomogen macht. Dennoch bleiben die identifizierten optimalen Anregungsbereiche über alle geometrischen Varianten hinweg vergleichbar. Diese identifizierten Zonen werden daher als bevorzugte Anregungsbereiche in der Messprozedurbeschreibung (siehe Anhang 1) empfohlen, um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten (siehe Abbildung 24). Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bieten eine solide Grundlage für die praktische Anwendung und Optimierung der Anregung in schwimmenden Estrichsystemen und tragen wesentlich zur Verbesserung der messtechnischen Untersuchungen bei.

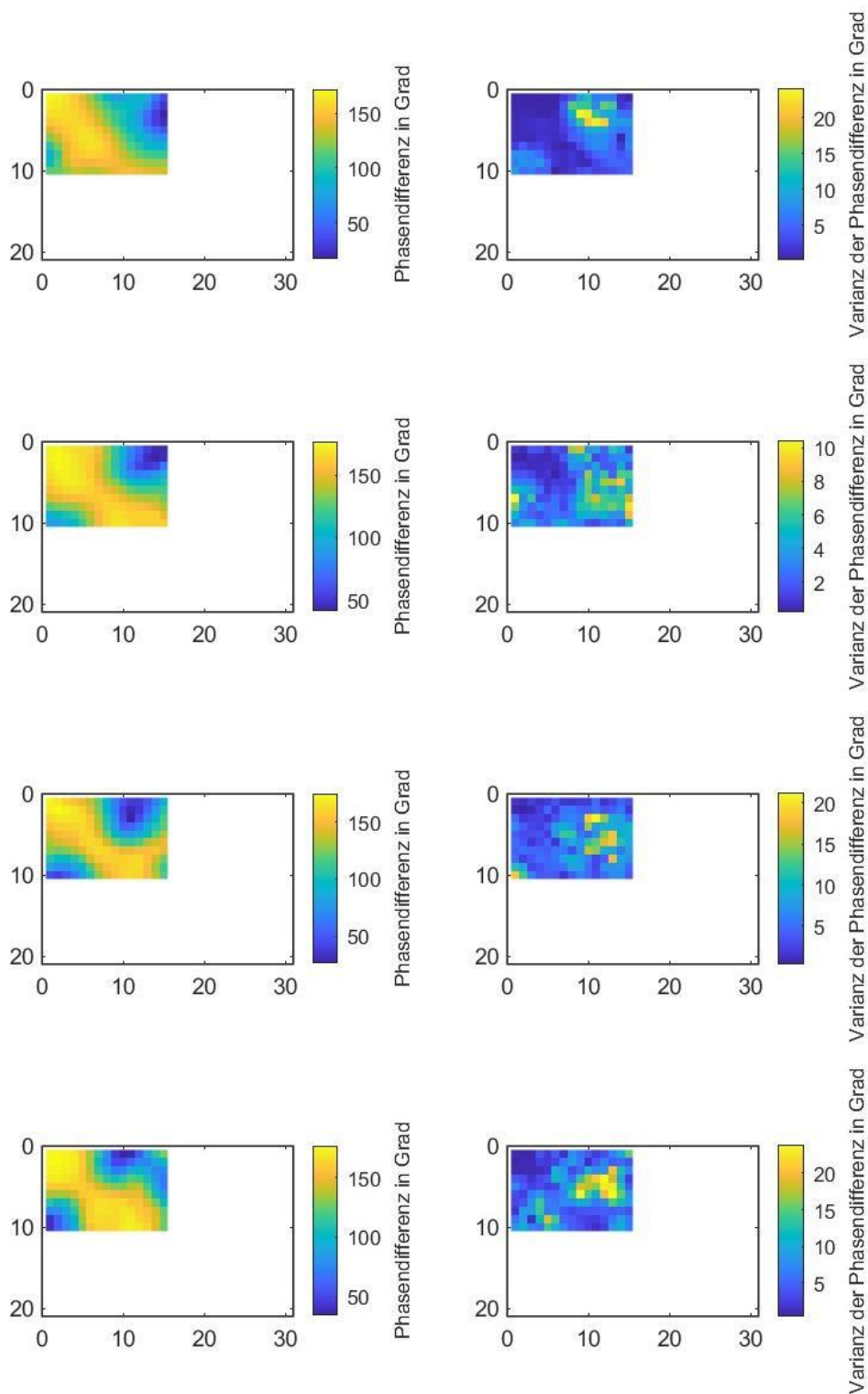


Abbildung 23: Darstellung der gemittelten Phasendifferenz für jeden Anregungspunkt im Quadranten innerhalb eines Radius von 20 cm gemittelt (links) und der in diesem Bereich auftretenden Varianz der Phasendifferenz (rechts) für ein Deckensystem aus Betondecke (18 cm), schwimmenden Estrichs (6cm) mit einer Trittschalldämmplatte ($s' = 5; 22; 50; 91 \text{ MN/m}^3$) mit den Abmessungen 6 m x 4 m, bei den jeweiligen Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenzen der Systeme (von oben nach unten: 35 Hz, 74 Hz, 111 Hz, 150 Hz), die Randbedingung der Ecken ist „frei aufgelagert“.

Erkenntnisse:

- Die Ergebnisse der numerischen Simulationen zeigen deutlich, dass die Interaktion der Schwingungsfelder zwischen der Estrichplatte und der Grunddecke zu einer inhomogenen Verteilung der Phasendifferenz zwischen der Schnelle an der Oberseite des Estrichs und der Schnelle an der Unterseite der Decke führt. Diese Inhomogenität reduziert sich besonders im Bereich der Anregung, wo bestimmte Teilbereiche eine maximale Phasendifferenz aufweisen. Diese Bereiche sind von besonderem Interesse, da die Phasendifferenz hier gleichmäßig verteilt ist, was darauf hinweist, dass die Anregung des Deckensystems für eine robustere Bestimmung der Masse-Feder-Masse-Resonanzfrequenz in der Nähe der Messposition auf der Estrichoberfläche erfolgen sollte.
- Wie in Abbildung 23 ersichtlich, gibt es Zonen, in denen die Phasendifferenz homogener ausgeprägt ist als in anderen Bereichen der Deckenfläche. Dieses Erkenntnis ist entscheidend für die Entwicklung optimaler Anregungsstrategien. Basierend auf diesen Simulationsergebnissen wurde, wie in Abbildung 24 dargestellt, eine Empfehlung für die Anordnung der Messpositionen entwickelt. Dabei sollte der Beschleunigungsaufnehmer oder Kraftsensor an der Oberseite des Estrichs und der Beschleunigungsaufnehmer an der Unterseite der Decke in den identifizierten Anregungszonen positioniert werden. Diese Zonen wurden gezielt aus der Phasendifferenz der Messsignale der beiden Sensoren abgeleitet, um die Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Masse-Systems möglichst präzise bestimmen zu können.

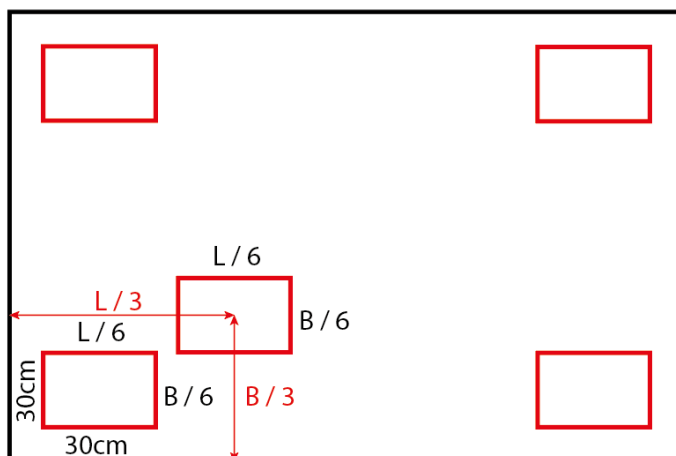


Abbildung 24: Messzonen für die Bestimmung der Masse-Feder-Masse Resonanz mittels des „Phasendifferenz“ Verfahrens

2.1.2.4 Entwicklung eines automatisierten Algorithmus zur Bestimmung der Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenz und Anwendung an Beispieldecken auf Baustellen

Die Bestimmung des Resonanzbereichs für die Masse-Feder-Masse-Resonanzfrequenz anhand der Phasenverläufe des Kreuzleistungsspektrums stellt aufgrund der großen Menge an generierten Daten und der teilweise stark variierenden Verläufe eine erhebliche Herausforderung für die manuelle Auswertung dar. Um diesem Problem zu begegnen, wurde eine automatisierte Auswertungsmethode entwickelt. Diese Methode filtert zunächst die messtechnisch erfassten Daten, um Rauschen und Störungen zu minimieren. Anschließend wird der Bereich, in dem sich die Resonanzfrequenz befindet, auf Basis des frequenzabhängigen Phasendifferenzverlaufs bestimmt, wie im Abschnitt 2.1.2.1 beschrieben. Die automatisierte Auswertung nutzt eine Analyse der Phasendifferenz, um den Resonanzbereich genau zu lokalisieren. Innerhalb dieses Bereichs wird dann die gemittelte Amplitude des Realteils der Übertragungsfunktion bzw. der Oberflächenbeschleunigung ermittelt, um die höchste Pegelspitze zu identifizieren. Diese höchste Pegelspitze entspricht der Resonanzfrequenz des Systems.

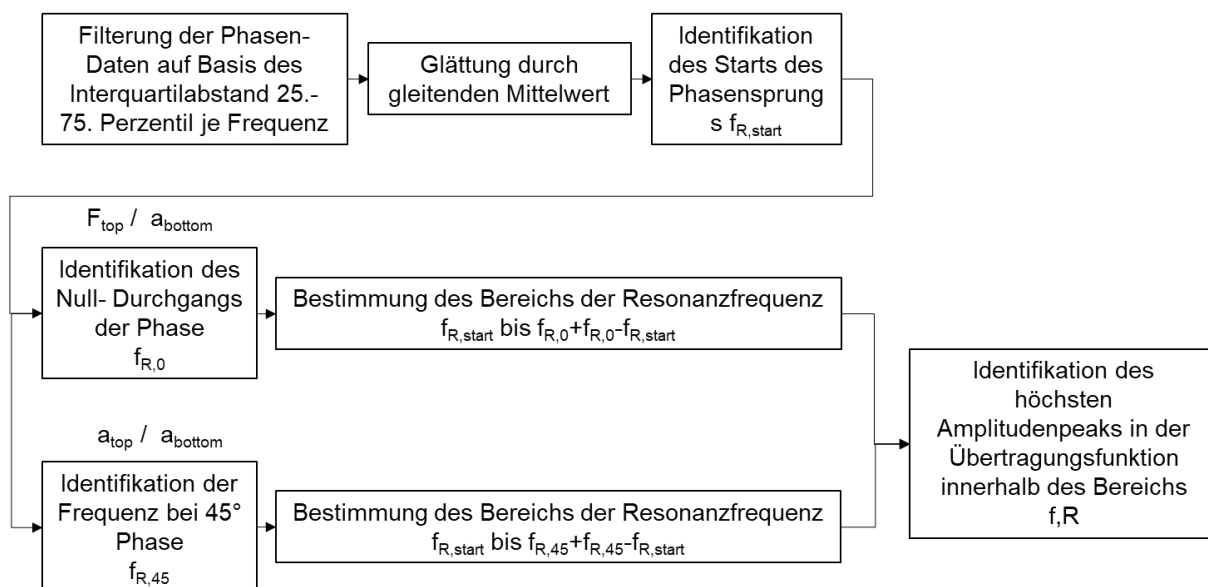


Abbildung 25: Flowchart zur Darstellung des Prozesses einer automatisierten Auswertung zur Bestimmung der Resonanzfrequenz eines schwimmenden Estrichsystems

Ein detaillierter Ablauf der durchgeführten Schritte zur automatisierten Bestimmung der Resonanzfrequenz ist im Flowchart in Abbildung 15 dargestellt. Dieses Flowchart veranschaulicht die einzelnen Phasen des Verfahrens, angefangen von der Datenfilterung über die Analyse der Phasendifferenz bis hin zur Bestimmung der Resonanzfrequenz.

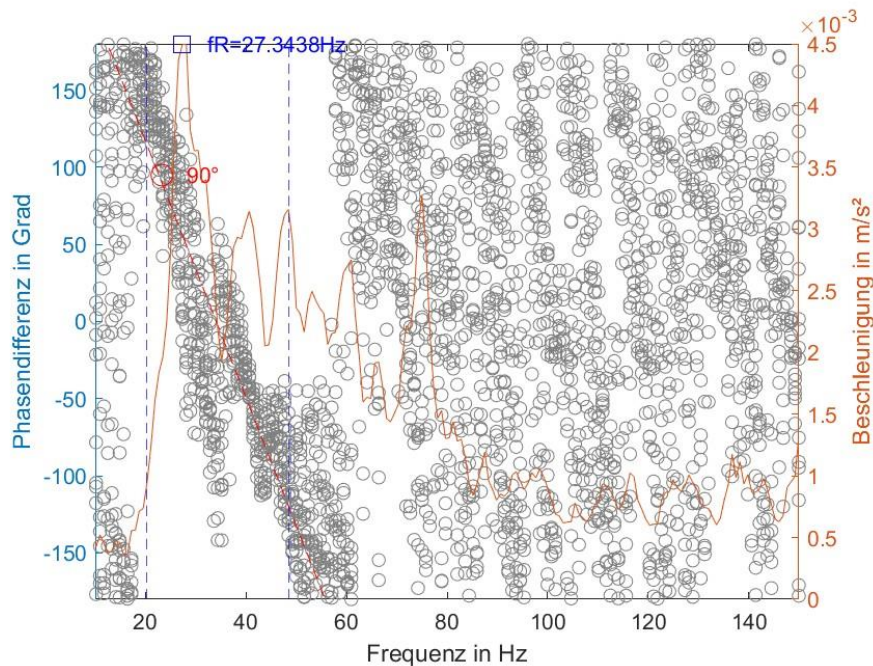


Abbildung 26: Ausgewähltes Ergebnis der automatisierten Bestimmung der Resonanzfrequenz auf Basis der beschriebenen Phasendifferenz – Methode (siehe Decke InSitu 1 Seite 47)

Abbildung 26 illustriert die Anwendung der automatisierten Auswertungsmethode am Beispiel der Deckenkonstruktion, wie in InSitu 1 auf Seite 47 beschrieben. Die Messung wurde gemäß der im Anhang 1 dargestellten Prozedur zur Bestimmung der „Phasendifferenz“ durchgeführt und anschließend durch die automatisierte Auswerteprozedur, die in Abbildung 25 gezeigt wird, analysiert. In der Abbildung sind die blau gestrichelten Linien zu sehen, die den durch die automatische Auswertung ermittelten Frequenzbereich darstellen. Innerhalb dieses Bereichs wurde die höchste Amplitudenspitze der Übertragungsfunktion als Resonanzfrequenz identifiziert. Diese grafische Darstellung verdeutlicht, wie die automatisierte Methode den Resonanzbereich präzise bestimmt und die Resonanzfrequenz auf Basis der Phasendifferenzmethode zuverlässig berechnet.

Erkenntnisse auf Basis der Anwendung der beschriebenen Methode an den Ergebnissen aus Abschnitt 2.2.1:

- Die durch den Impedanzhammer erzeugten Phasendifferenzen zwischen der eingeleiteten Kraft und der Beschleunigung an der Unterseite der Decke liefern ein klareres und einfacher zu interpretierendes Bild für die untersuchten Deckensysteme. Dies liegt daran, dass der Phasensprung im Bereich der Resonanzfrequenz bei der Impedanzhammer-Anregung deutlich ausgeprägter und eindeutiger ist als bei der Anregung mit einem Gummihammer, bei der die Phasendifferenz zwischen den Beschleunigungsaufnehmern an der Ober- und Unterseite der Decke bestimmt wird. Der stärkere Phasensprung ermöglicht eine präzisere Identifizierung der Resonanzfrequenz und reduziert die Komplexität bei der Analyse der Messdaten.

- Wie auch die numerischen Simulationen, wie in Abschnitt 2.1.2.3 beschrieben, bestätigen die auf der Baustelle gewonnen Messdaten, dass die Phasendifferenzen homogener und leichter interpretierbar sind, wenn die Anregung in der Nähe der Messpositionen durchgeführt wird. Dies erleichtert die genaue Bestimmung der Resonanzfrequenz und verbessert die Zuverlässigkeit der Messergebnisse.
- Bei hohen Modalenddichten in Estrichplatten und Grunddeckensystemen wird die Interpretation der Phasendifferenzen erheblich kompliziert. Die komplexen Schwingungsformen und die Interaktion zwischen Estrichplatte und Grunddecke machen die Analyse schwieriger und führen zu weniger eindeutigen Ergebnissen.
- Wenn die Resonanzfrequenz der abgehängten Decke kleiner ist als die Resonanzfrequenz des Estrichsystems, ist die präzise Bestimmung der Resonanzfrequenz des Estrichsystems nicht möglich. In solchen Fällen sollte die Messposition auf der Grunddecke selbst gewählt werden, um die Beeinflussung durch die Resonanzfrequenz der Grunddecke zu minimieren und eine genaue Bestimmung der Resonanzfrequenz des Estrichsystems zu gewährleisten

2.1.3 Messungen an der TU Graz

Aufbauend auf den Erkenntnissen des abgeschlossenen Forschungsprojekts Sound.Wood.Austria (Holzforschung Austria und TU Graz), insbesondere der im Messbericht (Vavrik-Kirchsteiger und Ferk 2024b) beschriebenen *Amplitudenmethode*, wurde von der TU Graz im Zuge dieses Projektes (und eines parallel laufenden Projektes zum Thema Stahlbetonleichtbau-Kassettendecken) eine vereinfachte, praxistaugliche Messmethode entwickelt, die nachfolgend Scherenmethode genannt wird. Dabei dienen die im Zuge dieses Projektes von der TU Graz durchgeführten Messungen des VK-ACA 1 im M-Prüfstand des Akustik Center Austria, als auch Messergebnisse des Projekts Sound.Wood.Austria sowie Messungen des Stahlbetonleichtbau-Kassettendeckenprojektes als Datenbasis.

Abbildung 27 zeigt die Messsituation an der TU Graz der Deckenkonstruktionen VK-TUG 1 und VK-TUG 2 des Projekts Sound.Wood.Austria. Die Auswertung der Messergebnisse anhand der Amplitudenmethode wird in (Vavrik-Kirchsteiger und Ferk 2024b) beschrieben. Im Zuge dieses Projektes wurden die Rohdaten der Messungen aus dem Projekt Sound.Wood.Austria für die Entwicklung und den Test der Scherenmethode hinzugezogen.

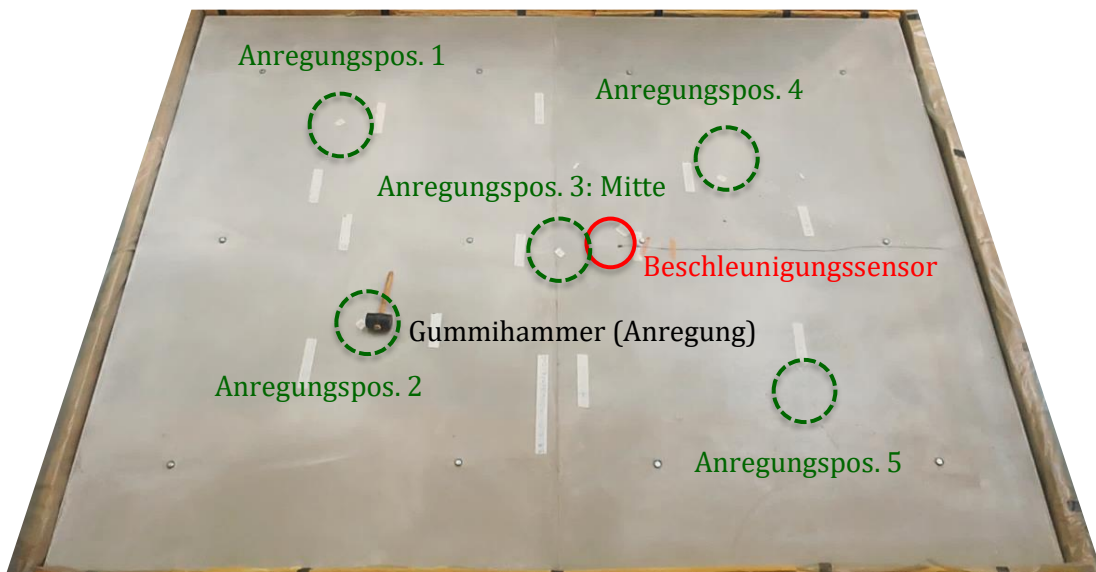


Abbildung 27: Messsituation an der TU Graz (senderaumseitig)

Die Messergebnisse der folgenden Versuchskörper (VK-TUG) wurden im Zuge des Projektes an der TU Graz hinsichtlich Resonanzfrequenz untersucht:

- VK-TUG 1. BSP-Decke mit TDPS 30
- VK-TUG 2. BSP-Decke mit TDPT 20

Nachfolgend werden die konkreten Bauteilaufbauten wiedergegeben:

Tabelle 19: Aufbau von Versuchskörper 1 an der TU Graz (VK-TUG 1) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60	Zementestrichplatte
30	ISOVER Trittschall-Dämmplatte TDPS 30
60	ungebundene Basaltsplittschüttung
200	5-schichte Brettsperrholzplatte (Fichte)

Tabelle 20: Aufbau von Versuchskörper 2 an der TU Graz (VK-TUG 2) von oben nach unten

Dicke in mm	Material
60	Zementestrichplatte
20	ISOVER Trittschall-Dämmplatte TDPT 20
60	ungebundene Basaltsplittschüttung
200	5-schichte Brettsperrholzplatte (Fichte)

Zur Messung der Resonanzfrequenz wurde folgende Messmethodik – nachfolgend Scherenmethode genannt - gewählt:

1. Anbringen jeweils eines Beschleunigungssensors deckenmittig an der Deckenober- und Unterseite.
2. Anregung mittels eines Gummihammers an drei bis fünf an der Deckenoberseite verteilten Anregungspositionen. Die Anregungspositionen wurden dabei so gewählt, dass zumindest einer davon im „Quadranten“ (d.h. dem Viertelpunkt der Deckenlänge und -breite), einer in „Deckenmitte“ in der Nähe des Beschleunigungssensors und teils nahe einer „Ecke“ (d.h. 30 cm von den Raumkanten entfernt) zu liegen kam.
3. Mindestens 3-malige Anregung der Decke mittels eines Gummihammers je Anregungsposition und zeitgleiche Messung der Antwort der Beschleunigungssensoren an der Deckenober- und Unterseite.

Für die Untersuchungen wurde die Messtechnik entsprechend Tabelle 21 eingesetzt:

Tabelle 21: Bei den Untersuchungen der TU Graz eingesetzte Messtechnik

Gerät	Hersteller	Typ
IEPE-Beschleunigungssensoren	Brüel & Kjaer	4507 002
Schwingungskalibrator	MMF	VC20
Mehrkanal-Datenerfassungssystem	Dewesoft	SIRIUSi

Die Auswertung der Messdaten erfolgte dabei folgendermaßen (Beispiele siehe auch Abschnitt 3.2.7 und 3.2.8):

1. Schmalbandauswertung (0,5 Hz-Schritte) der gemessenen Beschleunigungen sowie Mittelung der Messwerte der 3 Anregungen je Anregungsposition, getrennt für den Sensor der Deckenober- und Unterseite.
2. Pegelbildung der gemittelten Messwerte mit der Referenzbeschleunigung 10^{-6} m/s^2 .
3. Darstellung der Frequenzverläufe der Beschleunigungspegel der Deckenober- und Unterseite in einem Diagramm je Anregungsposition.
4. Bei Konstruktionen mit hoher innerer Dämpfung, d.h. wenn der deckenunterseitig gemessene Beschleunigungspegel tieffrequent (unterhalb des Einflussbereiches der Resonanzfrequenz) nicht auf dem Niveau des deckenoberseitigen Beschleunigungspegels liegt. Durchführung eines Pegelshifts: Parallelverschieben des deckenunterseitigen Beschleunigungspegels auf das Pegel-Niveau des deckenoberseitigen.
5. Lokalisieren des Frequenzbereichs, bei dem der deckenunterseitig gemessene Beschleunigungspegel gegenüber dem deckenoberseitigen tendenziell stark „absackt“.

6. Einzeichnen eines „Scherenblatts“, d.h. einer Art „Trendgeraden“, für die mittleren Beschleunigungspegel an der Deckenoberseite und eines „Scherenblatts“ für die mittleren Beschleunigungspegel an der Deckenunterseite für den Frequenzbereich oberhalb der in Punkt 5. lokalisierten Stelle des Pegelverlaufs.
7. Ablesen der Frequenz beim „Scherengelenk“, das aus den beiden „Scherenblättern“ resultiert.
8. Lokalisieren der bei der „Scherengelenk“-Frequenz nächstgelegenen tieffrequenteren markanten „Peaks“ der deckenober- und unterseitigen Beschleunigungspegel (Anm.: Für den deckenoberseitigen Beschleunigungspegel ist teilweise vor diesem „Peak“ eine ausgeprägte Anti-Resonanz erkennbar).
9. Abschätzung der Resonanzfrequenz durch Bildung des arithmetischen Mittelwerts der beiden in Punkt 7. ermittelten „Peak“-Frequenzen des deckenober- und unterseitigen Beschleunigungspegels.

Die der Scherenmethode zugrundeliegenden theoretischen Überlegungen sind tiefergehend in (Vavrik-Kirchsteiger und Ferk 2024a) aufgearbeitet.

2.2 In situ Messungen von Decken

Um die entwickelten Messmethoden in situ auf ihre Anwendbarkeit zu überprüfen und die Trittschallprognose den Messwerten gegenüber zu stellen, wurden Resonanzfrequenz- und Trittschallmessungen an nachfolgend aufgeführten Gebäuden von der HFA, der TU Graz und des TGM durchgeführt.

2.2.1 Messungen der HFA

- InSitu 1. Mehrgeschossiger Wohnbau in Holzrahmenbauweise mit Holzbalkendecke und abgehängter Unterdecke (siehe Tabelle 22)
- InSitu 2. Mehrgeschossiger Wohnbau in Holzrahmen- und Holzmassivbauweise mit Brettsperrholzdecke (siehe Tabelle 23)
- InSitu 3. Mehrgeschossiger Wohnbau (Dachaufstockung) in Massivbauweise mit Brettsperrholzdecke und abgehängter Unterdecke (siehe Tabelle 24)
- InSitu 4. Mehrgeschossiger Wohnbau in Holzmassivbauweise mit Brettsperrholzdecke (siehe Tabelle 25)
- InSitu 5. Mehrgeschossiger Wohnbau in Holzrahmenbauweise mit Holzbalkendecke und abgehängter Unterdecke (siehe Tabelle 26)
- InSitu 6. Einfamilienhaus in Holzrahmenbauweise mit Holzbalkendecke und abgehängter Unterdecke (siehe Tabelle 27)

In nachfolgenden Tabellen werden die Deckenaufbauten der in situ Messungen aufgeführt. Zusätzlich ist die im Gebäude verwendete Messmethode zu Ermittlung der Resonanzfrequenz (gemäß Tabelle 16) benannt. Die Norm-Trittschallpegel wurden nach

ÖNORM EN ISO 16283-2 und die maximalen Trittschallpegel der Decken gemäß ÖNORM EN ISO 10140-3 ermittelt. Dieses Vorgehen hat sich in den Vorversuchen im Prüfstand als geeignet erwiesen.

Tabelle 22: Deckenaufbau im untersuchten Gebäude In-Situ 1

Dicke in mm	Material	Messmethode Resonanzfrequenz
15,0	Fußbodenbelag	Phasendifferenz (Methode 2 gem. Tabelle 16)
70,0	Zementestrich	
30,0	Trittschalldämmung (Isover TDPS; $s' = 10 \text{ MN/m}^3$)	
60,0	Zementgebundene Splittschüttung	
18,0	Holzwerkstoffplatte	
250,0	Deckenbalken mit	
100,0	Gefachdämmung	
27,0	Federschiene (und 22 Sparschalung)	
18,0	Gipskartonfeuerschutzplatte	

Tabelle 23: Deckenaufbau im untersuchten Gebäude In-Situ 2

Dicke in mm	Material	Messmethode Resonanzfrequenz
15,0	Fußbodenbelag	Phasendifferenz (Methode 2 gem. Tabelle 16)
65,0	Zementestrich	
30,0	Trittschalldämmung (Isover TDPT; $s' = 10 \text{ MN/m}^3$)	
60,0	Splittschüttung	
200,0	Brettsperrholzdecke	

Tabelle 24: Deckenaufbau im untersuchten Gebäude In-Situ 3

Dicke in mm	Material	Messmethode Resonanzfrequenz
15,0	Fußbodenbelag	Phasendifferenz (Methode 2 gem. Tabelle 16)
70,0	Zementestrich	
30,0	Trittschalldämmung (Isover TDPS; $s' = 10 \text{ MN/m}^3$)	
98,0	gebundene EPS-Schüttung	
180,0	Brettsperrholzdecke	
15,0	Gipskartonfeuerschutzplatte	
50,0	Abhängung (mit Schwingbügel)	
12,5	Gipskartonbauplatte	

Tabelle 25: Deckenaufbau im untersuchten Gebäude In-Situ 4

Dicke in mm	Material	Messmethode Resonanzfrequenz
20,0	Fußbodenbelag (bei Messung noch nicht vorhanden)	Phasendifferenz (Methode 2 gem. Tabelle 16)
70,0	Heizestrich	
40,0	Trittschalldämmung (Isover Akustic EP 1; $s' = 8 \text{ MN/m}^3$)	
99,7	Splittschüttung	
200,0	Brettspertholzdecke	

Tabelle 26: Deckenaufbau im untersuchten Gebäude In-Situ 5

Dicke in mm	Material	Messmethode Resonanzfrequenz
15,0	Fußbodenbelag	Phasendifferenz (Methode 2 gem. Tabelle 16)
60,0	Zementestrich	
30,0	Trittschalldämmung (Isover TDPS; $s' = 10 \text{ MN/m}^3$)	
70,0	Splittschüttung	
22,0	Holzwerkstoffplatte	
240,0	Deckenbalken mit	
100,0	Gefachdämmung	
27,0	Federschiene (und 22 Sparschalung)	
25,0	Gipskartonfeuerschutzplatte (2 × 12,5 mm)	

Tabelle 27: Deckenaufbau im untersuchten Gebäude In-Situ 6

Dicke in mm	Material	Messmethode Resonanzfrequenz
10,0	Fußbodenbelag	Phasendifferenz (Methode 2 gem. Tabelle 16)
60,0	Zementestrich	
110,0	EPS-Dämmplatte (EPS W25, die dyn. Steife der EPS-Dämmung wurde mit Literaturdaten abgeschätzt $s' = 27 \text{ MN/m}^3$)	
18,0	Holzwerkstoffplatte	
280,0	Deckenbalken (200 mm Balken + 80 mm Lattung für Heizsystem) mit	
50,0	Gefachdämmung	
23,0	Sparschalung	
12,5	Gipskartonfeuerschutzplatte	

2.2.2 Messungen der TU Graz

InSitu 7. Mehrgeschossiger Wohnbau in Holzmassivbauweise mit BSP-Decke und abgehängter Unterdecke

InSitu 8. Mehrgeschossiger Wohnbau in Stahlbetonbauweise mit Stahlbetondecke ohne abgehängte Unterdecke

In nachfolgenden Tabellen werden die untersuchten Deckenaufbauten der in situ Messungen aufgeführt. Zusätzlich ist die im Gebäude verwendete Messmethode zu Ermittlung der Resonanzfrequenz benannt. Die Norm-Trittschallpegel der Decken wurden stets gemäß ÖNORM EN ISO 16283-2 ermittelt.

Tabelle 28: Deckenaufbau im untersuchten Gebäude In situ 7

Dicke in mm	Material	Messmethode Resonanzfrequenz
10	Parkett / Fliesen	Scherenmethode
65	Zementestrich	
30	ISOVER TDPT 30	
50	AUSTROTHERM EPS W25	
45	Schüttung (Splitt ungeb.)	
160	Massivholzplatte	
10	Luftschicht	
50	Mineralwolle	
12,5	GKB auf Schwingbügel	

Tabelle 29: Deckenaufbau im untersuchten Gebäude In situ 8

Dicke in mm	Material	Messmethode Resonanzfrequenz
10	Parkett / Fliesen	Scherenmethode
65	Zementestrich	
30	ISOVER TDPT 30	
125	Baumit ThermoStep Rapid	
200	Stahlbetondecke	
5	Innenputz / Spachtelung	

2.2.3 Messungen des TGM

InSitu 5. Mehrgeschossiger Wohnbau in Holzrahmenbauweise mit Holzbalkendecke und abgehängter Unterdecke (zusammen mit HFA)

InSitu 6. Einfamilienhaus in Holzrahmenbauweise mit Holzbalkendecke und abgehängter Unterdecke (zusammen mit HFA)

2.2.3.1 InSitu 5

Für diese Messungen standen je 2 Garconnieren im Erdgeschoß und darüberliegend im 1. Stock eines Wohngebäudes zur Verfügung. Die Grundrisse der beiden untersuchten Apartment-Paare sind unterschiedlich, wie untenstehend zur Beschreibung der Messdurchführung in Zeichnungen mit Angabe der Raumabmessungen und -volumina dargestellt.

Die Wohnungen waren in nahezu bezugsfertigem Zustand mit augenscheinlich fertig verlegtem und versiegeltem Laminatboden. Laut Angabe handelt es sich um eine Holzbalkendecke mit schwerem schwimmendem Estrich und abgehängter Decke. Die Holzbalken sind entsprechend den vorhandenen Lagerelementen verlegt.

Durch den Projektpartner HFA wurden folgende Angaben über den Aufbau von Decke und Fußboden übermittelt:

- 15 mm Fußbodenbelag
- 60 mm Zementestrich
- 30 mm Trittschalldämmung mit $s' = 10 \text{ MN/m}^3$
- 70 mm Splitschüttung
- 22 mm Holzwerkstoffplatte
- 240 mm Deckenbalken mit 100 mm Gefachdämmung
- 27 mm Federschiene (und 22 Sparschalung)
- 25 mm Gipskartonfeuerschutzplatte (2 x 12,5 mm)

Messungen gemäß EN ISO 16283-2:

In der nachfolgenden Abbildung sind die Grundrisspläne der beiden Wohnungspaare dargestellt und dazu die Abmessungen angegeben. Weiters sind die Anregungspunkte für die Messungen des Trittschallpegels eingezeichnet.

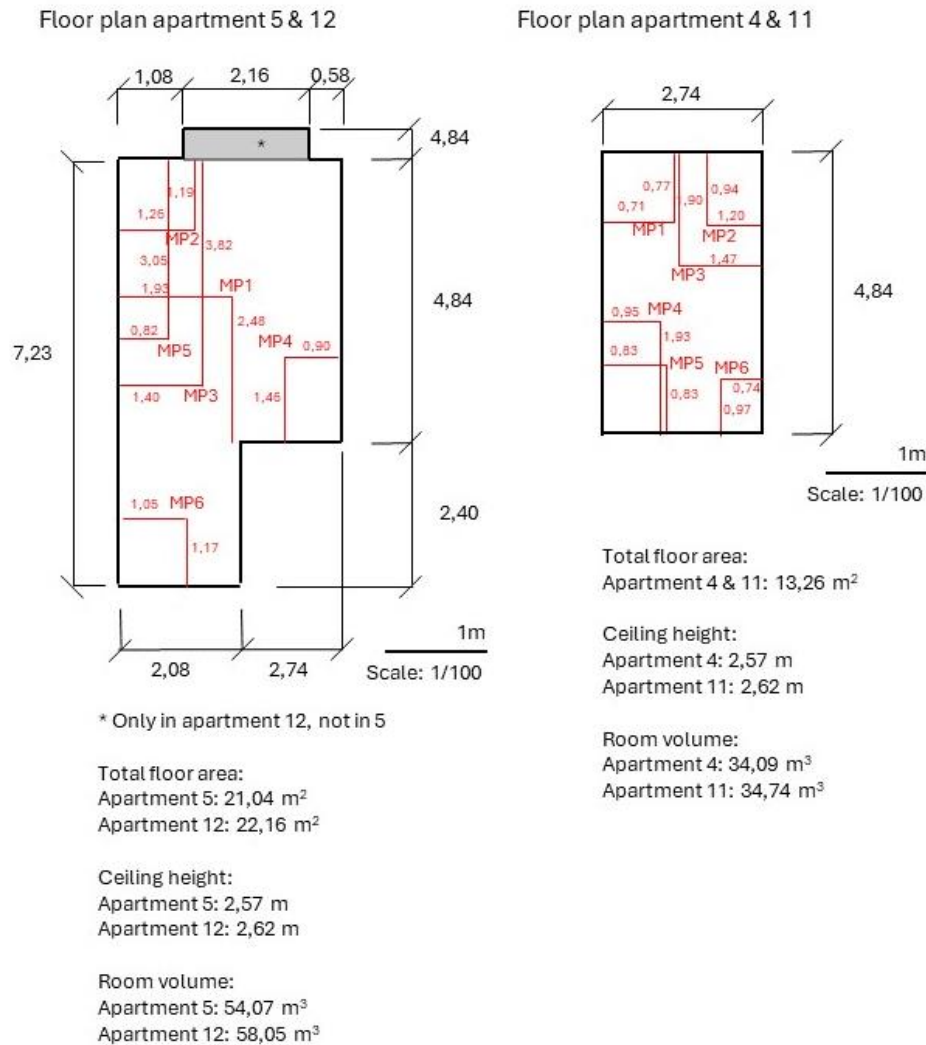


Abbildung 28: Grundriss der untersuchten Decken und Messpunkte

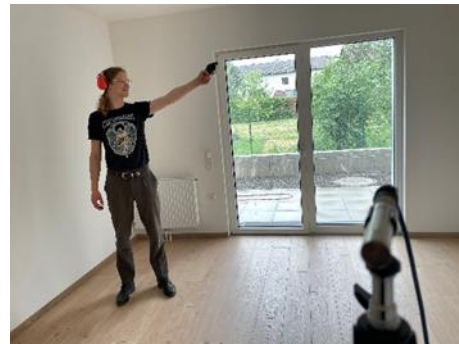
Die Messungen erfolgten gemäß EN ISO 16283-2 einmal mit Anregung durch das Normhammerwerk (Type Norsonic 211A) und einmal mit Anregung durch den Gummiball (Type Svantek SP95). Der Schalldruckpegel im Empfangsraum wurde im Mittel über 6 Positionen im Raum mit einem Schallpegelanalysator (Type Norsonic 140) aufgenommen. Dazu wurde die Nachhallzeit im Raum mit Impulsanregung durch einen Signalrevolver ermittelt. Das Hammerwerk, die Schallpegelmesseinrichtung sowie die Nachhallzeitmessung sind nachfolgend abgebildet.



a)



b)



c)

Abbildung 29: a) Normhammerwerk b) Schallpegelmesseinrichtung c) Nachhallzeitmessung

Mit diesem Messaufbau wurde durch Anregung mittels Normhammerwerk der bewertete Standard-Trittschallpegel L'_{nTw} und durch Anregung mittels Gummiball der maximale A-bewertete Standard-Trittschallpegel $L'_{IA,Fmax,V,T}$, wie in EN ISO 717-2 definiert ermittelt.

2.2.3.2 InSitu 6

Für diese Messungen stand ein Einfamilienhaus zur Verfügung, in welchem die Decke zwischen einem als Büro vorgesehenen Raum im Erdgeschoß und einem darüberliegenden Schlafraum im 1. Stock untersucht wurde.

Durch den Projektpartner HFA wurden folgende Angaben über den Aufbau von Decke und Fußboden übermittelt:

- 10 mm Fußbodenbelag
- 60 mm Zementestrich
- 110 mm Trittschalldämmung mit $s' = 27 \text{ MN/m}^3$
- 18 mm Holzwerkstoffplatte
- 280 mm Deckenbalken mit (200 mm Balken + 80 mm Lattung für Heizsysteme mit 50 mm Gefachdämmung
- 23 mm Sparschalung
- 12,5 mm Gipskartonfeuerschutzplatte

In der nachfolgenden Abbildung ist der Grundriss der untersuchten Decke mit den 6 Anregungsbereichen dargestellt. Es wurden in jedem dieser Bereiche 3 bereits durch den Projektpartner HFA angelegte Messpositionen übernommen.

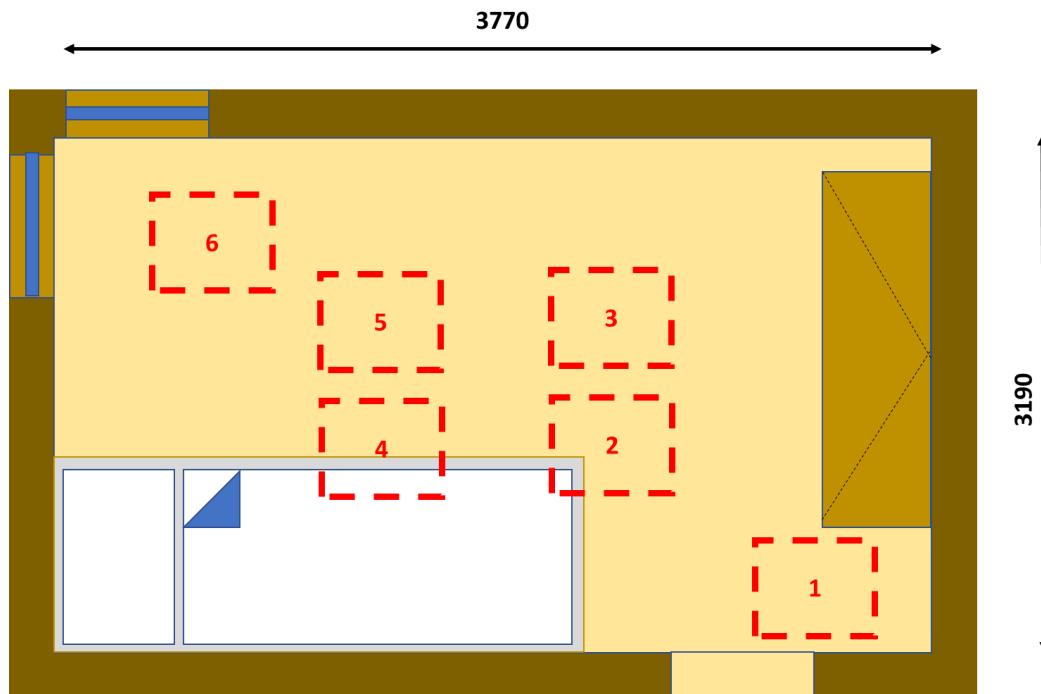


Abbildung 30: Grundriss der untersuchten Decke mit den Anregungsbereichen

Anders als im zuvor beschriebenen Gebäude Nr. 5 konnten hier auch die Messungen mit Anregung durch den Impulshammer (Type PCB 086C03) ausgewertet werden. Dem gegenüber musste hier bei Anregung mit dem Gummiball (Type Svantek SP 95) beachtet werden, den senderaumseitigen Beschleunigungsaufnehmer (Type MMF KS878C) nicht zu übersteuern. Es wurde daher auf dem Fußboden ein zweiter Beschleunigungsaufnehmer mit geringerer Empfindlichkeit (Type MMF S95C.10) angebracht.

Die Situation in den beiden übereinander liegenden Räumen mit den Beschleunigungsaufnehmern an der abgehängten Decke im Erdgeschoß und auf dem Fußboden im 1. Stock ist nachfolgend photographisch abgebildet:



Abbildung 31: a) + b) Senderaum im 1. Stock c) Empfangsraum mit Beschleunigungsaufnehmern an der Decke d) Beschleunigungsaufnehmer am Anregungspunkt

2.3 Abgleich des gemessenen und prognostizierten Trittschallschutzes und der kritischen Resonanzfrequenz

Die Resonanzfrequenz für Deckenaufbauten welche Zweimassenschwinger darstellen (z. B. BSP-Decke mit Fußbodenaufbau) wurde gemäß Formel 3 ((Hessinger et al. 2020) Seite 195ff) berechnet. Dies wird im weiteren als Standardansatz bezeichnet. Die Berechnung für Dreimassenschwinger: (z. B. BSP-Decke mit Fußbodenaufbau und abgehängter Unterdecke) erfolgte gemäß Formel 4 (Blevins 2001).

Beim Dreimassenschwinger bilden sich entsprechend Formel 4 zwei Resonanzfrequenzen aus, eine, bzgl. der Frequenzlage, „untere“ (f_{01}) und eine „obere“ (f_{02}) Resonanzfrequenz. Entsprechend der ÖNORM B 8115-5:2021 Abschnitte 3.4/3.5 soll die „maximale

Resonanzfrequenz“ (d.h. die „obere“ Resonanzfrequenz) zur Klassifizierung des Schallschutzes herangezogen werden.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen wurde jedoch ersichtlich, dass die Schalldämmung der Decken im Wesentlichen durch die untere Resonanzfrequenz bestimmt wird. Der Einbruch in der Schalldämmung durch die obere Resonanzfrequenz ist häufig nicht maßgeblich und wird durch das bereits wirkende, zweischalige Schwingungssystem entschärft. Nachfolgend wird deshalb bei Dreimassenschwingern die untere Resonanzfrequenz als maßgeblich angesehen und primär ausgewertet.

$$f_0 = 160 \sqrt{s' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \quad \text{Formel 3}$$

$$f_0 = \frac{1}{2^{3/2}\pi} \left\{ \left[\frac{s'_a + s'_b}{m_2} + \frac{s'_a}{m_1} + \frac{s'_b}{m_3} \right] \pm \left[\left(\frac{s'_a + s'_b}{m_2} + \frac{s'_a}{m_1} + \frac{s'_b}{m_3} \right)^2 - 4s'_a s'_b \left(\frac{1}{m_1 m_2} + \frac{1}{m_2 m_3} + \frac{1}{m_1 m_3} \right) \right]^{1/2} \right\}^{1/2} \quad \text{Formel 4}$$

Für die Prognose der Trittschalldämmung im Gebäude ist neben der Kenntnis des trennenden Bauteils (= Geschossdecke) die flankierende Übertragung zu berücksichtigen. Die maßgeblichen Übertragungswege Df und DFf sind in Abbildung 32 abgebildet.

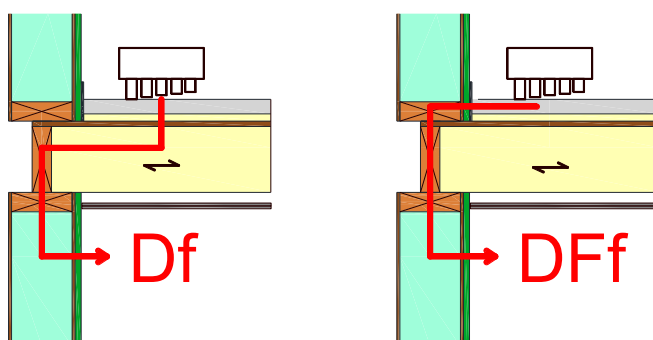


Abbildung 32: Maßgebliche Flankenwege bei Trittschallanregung nach (DIN 4109-2). Grafik aus (Stenitzer et al. 2024).

Als Basis für die Prognose des bewerteten Norm-Trittschallpegels $L'_{n,w}$ dienten Labormesswerte aus Bauteilkatalogen für jeweils annähernd gleiche Deckenaufbauten. Dabei wurde vor allem auf www.dataholz.eu, (DIN 4109-33) und die interne Messdatenbank der HFA zurückgegriffen.

Die Prognose der Trittschalldämmung inkl. flankierender Anteile erfolgte entsprechend des differenzierten Verfahrens in (Rabold et al. 2020) und (Blödt 2020). Dabei wird die Trittschalldämmung nicht nur auf Basis der ungünstigsten Flanke (vgl. Verfahren in (DIN 4109-2)), sondern durch rechnerische Berücksichtigung aller Flanken ermittelt. Die Korrektursummanden K_1 und K_2 für die maßgeblichen Flankenwege D_f und D_{ff} stammen aus (DIN 4109-2). Ein anschauliches Beispiel für das Vorgehen bei der Prognose nach diesem Verfahren ist im Anhang in (Blödt 2020) gegeben.

Für die Prognose relevante Flankenlängen sowie Abstrahlflächen wurden den zur Verfügung gestellten Plänen entnommen und vor Ort überprüft. Eine Auflistung der für die Prognose gewählten Kennwerte und den Berechnungsvorgang für die Prognose selbst ist in „Anhang 4: Prognose Trittschalldämmung in situ“ zu finden.

2.4 Erstellen eines Bauteilkatalogs mit rechnerischer Analyse der Resonanzfrequenzen von typischen Trenndecken

Zur Berechnung der Resonanzfrequenzen von Trenndecken für den Bauteilkatalog in Anhang 3 wurde Formel 3 oder Formel 4 verwendet. In Tabelle 30 sind die verwendeten Rohdichten der ausgewählten Materialien aufgeführt.

Tabelle 30: Übersicht der verwendeten Rohdichten zur Berechnung der Resonanzfrequenzen

Baustoff	Dichte in kg/m ³	Quelle
Zementestrich	2000	(Hohmann 2023)
Splittschüttung (2/4 mm Körnung)	1500	Erfahrungswert aus internen Messdaten der Holzforschung Austria
Nutzholz	450	(Hohmann 2023)
OSB-Platte	600	(Hohmann 2023)
Gipskartonplatten	700	(Hohmann 2023)
EPS	30	(Hohmann 2023)
Gipsfaserplatten	1200	(Hohmann 2023) und Datenblätter verschiedener Hersteller

2.5 Analyse des Anforderungsdeskriptors „Resonanzfrequenz“

Die Einführung der ÖNORM B 8115-5 „Klassifizierung“ im Jahre 2012 sollte die Möglichkeit eröffnen, mit verschiedenen Schallschutzniveaus Erfahrung zu sammeln und dem Nutzer einen Einblick zu geben, in Hinblick auf einen Zusammenhang zwischen dem realisierten Schallschutz auf Basis der geltenden Deskriptoren und dem zu erwartenden Ergebnis in Bezug auf Hörbarkeit und Vertraulichkeit.

Die ursprüngliche Intention der Norm war es zum einen, eine Hilfestellung für die Beschreibung verschiedener Qualitäten des Schallschutzes zu bieten, insbesondere für den Nutzer, der üblicherweise in Bezug auf die erforderlichen Zusammenhänge und Deskriptoren kein Grundlagenwissen aufweist. Damit sollte dieser zum einen in die Lage versetzt werden, in einer Planung einen höheren als den baurechtlich geforderten Mindestschallschutz als Zielbeschreibung artikulieren zu können. Zum anderen sollte dadurch auch die Möglichkeit gegeben werden, eine differenziertere Zuordnung des vorhandenen Schallschutzes in einem Gebäude durchführen zu können, bis hin zu einem Schallschutzausweis, der die schalltechnische Qualität auf Basis der in den Anforderungsspezifikationen angeführten Deskriptoren beschreibt. Ein weiterer Zweck dieser ersten Klassifizierungsnorm aus dem Jahr 2012 bestand darin, dass damit erste Erfahrungen mit höheren Schallschutzklassen gesammelt werden sollten, z.B. in Hinblick auf die Planung, Bauteil- und Fügungsentwicklung bis hin zur Bewertung des empfundenen Schallschutzes.

Auf dem Weg zu einer umfassenden, empfindungsgerechten Beschreibung des Schallschutzes sind dabei noch zahlreiche Hürden zu überwinden. Dazu gehören die Übersetzung technischer Deskriptoren in empfindungsadäquate Größen, als auch die Entwicklung von in der Praxis erwünschten, einfachen Einzalangaben der „Schalldämmung“ für massive, leichte und hybride Bauteile. Zudem muss die Wirkung der Grenzen des Betrachtungsmodells berücksichtigt werden. Dies schließt die Berücksichtigung von Effekten wie das Estrichdröhnen und Raummodeneffekte mit ein, die im Sinne einer Einzelfallbetrachtung gegebenenfalls auch die Einbeziehung von weiteren Einflussfaktoren erfordern, die über die derzeit in der Praxis üblicherweise verwendeten Modelle hinaus reichen. Dazu zählen z.B. die Dämpfung, die Modellierung von 3-D-Effekten, die Modellierung der spezifischen Lagerbedingungen und die Energiedissipation über mitwirkende Bauteile und Strukturen.

Betrachtet man die Kurven gleicher Lautstärke der ISO 226 wird zusätzlich klar, dass zwar das Gehör für tiefe Frequenzen weniger empfindlich ist, sich jedoch die Abstände für die Differenzierung der Lautheit im tiefen Frequenzbereich gegenüber den mittleren Frequenzbändern nahezu halbieren. Dadurch weisen Störungen durch eine schlechtere Schalldämmung im tieffrequenten Bereich eine höhere Relevanz in Bezug auf die empfundene Lautheit auf. Dies gewinnt insbesondere beim Trittschallpegel eine besondere Bedeutung, da

hier neben der Resonanzfrequenz auch weitere Einflüsse, wie modale Effekte, Effekte aufgrund von Mehrschaligkeit und Dämpfung wichtig werden können.

Geht man von den bestehenden Einzahlangaben als Deskriptoren für die Schalldämmung aus, besteht heute dazu noch das Problem, dass die für die Ermittlung der Einzahlangabe verwendete Bezugskurve zum einen von einem niedrigerem, als dem heutigen Niveau üblichen abgeleitet wurde, und zum anderen die dabei betrachteten Bauteile Massivbauteile mit der damit verbundenen spektralen Charakteristik der Schalldämmung waren. Die heute oft eingesetzten, mehrschaligen Bauteile können aber eine völlig abweichende Charakteristik aufweisen. Dadurch kann der gleiche Einzahlwert für zwei bauakustisch völlig unterschiedlich wirkende Bauteile ermittelt werden, die dann aber bei adäquater schalltechnischer Last völlig unterschiedlich in der Wirkung empfunden werden und auch physikalisch unterschiedlich wirken. Eine Angabe der Leistung eines Bauteils bezüglich der Schalldämmung in Terzbandwerten erscheint aktuell für die Praxis wenig aussichtsreich, sodass verschiedene Vorschläge erarbeitet wurden, zumindest die wichtigsten Aspekte des spektralen Verlaufes der Schallquelle bzw. der Schalldämmung des Bauteils zu beschreiben, z.B. über Spektrum-Anpassungswerte.

Dennoch sind auch diese nicht in allen Fällen befriedigend, wobei sich derzeit ein gewisser Konsens für den Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50-2500}$ abzeichnet, um das tieffrequente Verhalten von Deckenkonstruktionen beim Trittschall in der Beschreibungsgröße einzubeziehen. Jedoch können auch hier abweichende Ergebnisse im tatsächlich vorhandenen Schallschutz auftreten, wie z.B. bei sehr steilen Gradienten im Verlauf des Trittschallpegels bei spektraler Betrachtung, die hier nicht wirkungsadäquat abgebildet werden können.

Das Problem, das sich dabei ergibt ist, dass nur für wenige Konstruktionen Modelle für eine praxismgerechte rechnerische Ermittlung der Schalldämmung in den erforderlichen Terzbandwerten, aus denen der Spektrum-Anpassungswert abgeleitet werden kann, existieren. In diesen Fällen können die erforderlichen Größen wieder nur durch terzbandaufgelöste Messungen ermittelt werden, was wiederum für die Planungsaufgabe unbefriedigend ist. Zudem ergeben sich durch die Unterschiede der Lagerung im Prüfstand und am Bau jeweils weitere Einflüsse, die auch für massive Deckenkonstruktionen schlagend werden können, wie z.B. Estrichdröhnen, und künftig tiefergehend noch zu untersuchen wären.

In der aktuellen Ausgabe der ÖNORM B 8115-5:2021 wird die Resonanzfrequenz als alternative Zuordnungsgröße in der Klassifizierung für den Luft- und Trittschallschutz zu anderen Nutzungseinheiten eingeführt.

Im Anhang B der Norm wird angeführt, dass die Hörbarkeit stark abhängig ist von der Frequenzzusammensetzung der Schallquelle und dem Frequenzgang der Schalldämmung, und dass die subjektive Empfindung von (normal empfindenden Menschen) wiederum ebenfalls deutlich unterschiedlich sein kann. In der Folge wird festgehalten, dass es

dementsprechend schwierig ist, eine „subjektive Empfindung“ ganz allgemein zu beschreiben. Für die dennoch angeführten tabellenförmigen Zusammenstellungen für den Luft- und Trittschall sowie für haustechnische Geräusche werden mögliche Abweichungen von 10 dB bis 20 dB angegeben. Dies lässt darauf schließen, dass die in den Tabellen angeführten Zusammenhänge für eine Planungsaufgabe nur mit sehr hohen Unsicherheiten verwendbar sind.

Da die Klassifizierung gemäß ÖNORM B 8115-5:2021 dem Zwecke dient für „ein Gebäude, eine Nutzungseinheit oder einen einzelnen Raum“ eine Schallschutzklasse zuzuweisen (Abschnitt 5.3 dieser Norm), und „der Nachweis der Erfüllung des Schallschutzes“ rechnerisch oder messtechnisch erfolgen kann, ist davon auszugehen, dass die Beschreibungsgrößen sowohl für die Planung als auch für die Gütemessung in Hinblick auf die in der Norm dargelegte Klassifizierung verwendet werden sollen bzw. verwendet werden können. (Eine Klassifizierung eines Bauteils im Prüfstand ist in dieser Norm nicht vorgesehen). Aus dem oben angeführten ist aber auch abzuleiten, dass die angeführten Deskriptoren im Allgemeinen bei der Erfüllung der dargelegten Werte für eine Klasse jeweils äquivalent zu verstehen sind. Dass also, insbesondere da die Wahl des Deskriptors und des zugeordneten Wertes ohne Einschränkungen verwendet werden kann, sich unabhängig von dieser Wahl die gleiche Klassifizierung ergeben muss, wenn eine sich darauf basierende Zuordnung auch nachvollziehbar und sicher möglich sein soll. Da dazu auch keine Toleranzbereiche oder Unsicherheiten in der Norm angeführt sind, müsste das Kriterium sich in 1 dB Schritten entsprechend äquivalent zuordnen lassen. Auch bei der Auflösung zur Resonanzfrequenz bestehen keine näheren Angaben. So ist aus der Tabelle zur Einteilung in Schallschutzklassen keine Abstufung angegeben, z. B. ob es sich um 1 Hz Schritte oder Terzbandschritte handelt. Bestenfalls könnte man für den Fall der Zuordnung über eine Gütemessung noch die Messunsicherheit gemäß ÖNORM B 8115-6:2011 jeweils auf der sicheren Seite zur Anrechnung bringen, um die durch die Messung eingetragenen Unsicherheiten zu berücksichtigen. Für die Planung selbst könnten in den jeweiligen Planungsnormen vorhandene Prognoseunsicherheiten in Erwägung gezogen werden, so solche Angaben in den spezifischen Regeln der Technik entsprechend vorliegen und ausgewiesen werden.

Um zu untersuchen, ob sich ein entsprechendes Äquivalenzprinzip ableiten lässt, wurden aus einer Datenbank mit Gütemessungen in mehrgeschossigen Wohnbauten der letzten 20 Jahre stichprobenartig Beispiele ausgewählt, hinsichtlich der angeführten Deskriptoren ausgewertet und damit eine Klassifizierung des Luft- bzw. Trittschallschutzes durchgeführt.

Die Eignung des Anforderungsdeskriptors „Resonanzfrequenz“ als Kriterium für die empfundenen Performance einer Holzbaukonstruktion im Trittschallschutz wurde anhand einer statistischen Auswertung von 100 aus dieser Datenbank zufällig ausgewählten Messergebnissen von Holzmassivdeckenkonstruktionen analysiert. Bei den ausgewählten Decken mit den in Tabelle 31 beschriebenen Aufbauvarianten handelt es sich um Konstruktionen, die als 2- und 3-Massenschwinger wirken. Die Aufbauten wurden aus den

jeweiligen bauphysikalischen Einreichunterlagen übernommen. Die Messergebnisdatenbasis stammt aus in situ-Messungen der Trittschalldämmung nach ISO 140-7 bzw. ISO 16283-2, welche im Rahmen von Güteprüfungen in den Jahren 2002 bis 2022 vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung durchgeführt wurden. Dabei handelt es sich um Messungen der Direktübertragung zwischen direkt übereinanderliegenden Räumen sowie Diagonalmessungen zwischen diagonal übereinander sowie auch nebeneinander angeordneten Räumen.

Tabelle 31: Aufbauvariationen der betrachteten 100 Holzmassivdeckenkonstruktionen

Fliesen / Parkett / Laminat / PVC / Linoleum
Estrich 50 bis 70 mm
EPS-T / MW-T 20 bis 35 mm mit und ohne EPS - W20 / W25 20 bis 50 mm
(Betonplatten) + Schüttung gebunden / ungebunden 30 bis 108 mm + BSP bzw. Brettstapeldecke 100 bis 220 mm + (GKP/GKF 12,5 mm) ODER Schüttung gebunden 50 mm
MW/ Luft 20 mm bis 100 mm ODER Weichfaserplatte 20 mm / Bitumenfilz 3mm
GKP 12,5 / GKF 12,5mm oder 15mm oder 18mm / GFP 15 mm / BSP 60 mm ODER BSP bzw. Brettstapeldecke 180 mm

Für die Analyse der Eignung des Anforderungsdeskriptors „Resonanzfrequenz“ wurde eine Klasseneinteilung nach der neu überarbeiteten ÖNORM B 8115-5:2021 auf Basis der in situ gemessenen, bewerteten Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ [dB] in Kombination mit den zugehörigen Spektrum-Anpassungswerten $C_{1,50}$ [dB] vorgenommen. Dem wurde eine Klasseneinteilung auf Basis der in situ gemessenen, bewerteten Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ [dB] in Kombination mit der prognostizierten Resonanzfrequenz f_0 [Hz] gegenübergestellt. Dabei erfolgte die Klasseneinteilung nach ÖNORM B 8115-5:20201 für das Empfindlichkeitsniveau 0 [dB], was normgemäß zum Beispiel einem Aufenthaltsraum in einem Wohngebäude entspricht. Für die Prognose der Resonanzfrequenz erforderlichen Materialkennwerte wurden, soweit bekannt, den Herstellerdatenblättern entnommen. Ansonsten wurden materialübliche Werte angenommen.

Des Weiteren wurde die prognostizierte Resonanzfrequenz f_0 [Hz] mit der aus den Messwerten approximierten Resonanzfrequenz verglichen. Die Abschätzung der Resonanzfrequenz erfolgte auf Basis der Trittschallpegel-Messwerte L'_{nT} [dB], wobei diejenige Frequenz identifiziert wurde, bei der ein „Peak“ bzw. darauffolgender „steiler Abfall“ im Terzbandverlauf erkennbar war. Dies basiert auf der Annahme, dass sich die Terzbandcharakteristik des Trittschallpegels im Bereich der Resonanzfrequenz eines mehrschaligen Bauteils in umgekehrter Richtung analog zur Terzbandcharakteristik der Luftschalldämmung verhält. So ist im Allgemeinen im Terzbandverlauf der Luftschalldämmung bei der Resonanzfrequenz ein

markanter Einbruch zu erkennen, der von einem bei höheren Frequenzen steilen Anstieg von 18 dB / Oktave gefolgt wird (siehe Abbildung 7.43: Qualitativer Verlauf der Schalldämmung eines zweischaligen Trennelementes als Funktion der Frequenz nach (Zürcher und Frank 2021)).

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Entwicklung einer praktikablen Methode zur Resonanzfrequenzmessung

Nachfolgend werden exemplarische Ergebnisse aus den durchgeführten Laboruntersuchungen aufgeführt um die Entwicklung der beiden folgenden Messmethoden zu erläutern:

- Scherenmethode
- Phasendifferenzmethode

3.1.1 Scherenmethode

Tabelle 32 zeigt alle im Labor mit der Scherenmethode untersuchten Decken mit den jeweils ermittelten Resonanzfrequenzen. Die Ergebnisse aus den Amplitudenmessungen nach dem Mess- und Auswerteverfahren nach (Vavrik-Kirchsteiger und Ferk 2024b) zeigen für die im Labor betrachteten Deckenkonstruktionen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Scherenmethode.

Die Ergebnisse der Scherenmethode in Tabelle 32 können mit der Übertragungsfunktion der Auslenkung der Ober- bzw. Unterseite bezogen auf die Anregungskraft verglichen werden. Wie aus (Vavrik-Kirchsteiger und Ferk 2024a) hervorgeht, ist bei der Übertragungsfunktion, bei der sich die Auslenkung der Ober- bzw. Unterseite jeweils auf die Anregungskraft bezieht, beim $180/2^\circ = 90^\circ$ Sprung der Phase der Übertragungsfunktion die Resonanzfrequenz abzulesen. Für Bauteile mit einer hohen Dämpfung, die im Bereich der Resonanzfrequenz keinen vollständigen 180° Sprung aufweisen, ist ca. beim entsprechend reduzierten Sprungs/ 2° die Frequenz abzulesen. Für diese hoch bedämpften Systeme ist für eine Resonanzfrequenz-Abschätzung in weiterer Folge eine Mittelung des Frequenzergebnisses des deckenoberseitigen Sensors mit jenem des deckenunterseitigen Sensors vorzunehmen.

Tabelle 32: Im Labor untersuchte Deckenaufbauten und mit der Scherenmethode im Vergleich zur Amplitudenmessung ermittelte Resonanzfrequenzen

Deckenaufbau	Resonanzfrequenz f_0 in Hz
VK-ACA 4	ca. 68 Hz (Amplitudenmessung) ca. 70 Hz (Scherenmethode)
VK TUG 1	ca. 34 Hz (Amplitudenmessung) ca. 36 Hz (Scherenmethode)
VK-TUG 2	ca. 37 Hz (Amplitudenmessung) ca. 39 Hz (Scherenmethode)

3.1.2 Phasendifferenzmethode

Exemplarisch für die ausgeführten Messungen im Prüfstand werden die Kurvenverläufe in Abbildung 33 und Abbildung 34 gezeigt. Zu sehen sind die Ergebnisse aus der Vergleichsmessung, welche mit den anderen Instituten durchgeführt wurden (siehe Tabelle 33, grau hinterlegte Zeile). Dargestellt sind nachfolgend die Frequenzverläufe des Norm- und des Maximal-Trittschallpegels (Abbildung 33). Zusätzlich sind zwei Marker für die berechnete ($f_{0, \text{Ber}}$, rot) und die aus der Ballmessung bestimmte Resonanzfrequenz ($f_{0, \text{Ball}}$, blau) eingetragen. Zur Festlegung der Resonanzfrequenz aus der Ballmessung wird versucht eine Terzbandfrequenz zu finden bei der ein starker Abfall auftritt, was darauf hindeutet dass ab diesem Terzband die Zweischaligkeit zu wirken beginnt. In Abbildung 33 liegt die berechnete Resonanzfrequenz bei 68 Hz und die der Ballmessung bei 63 Hz. In Abbildung 34 werden der gemittelte Phasen- und Amplitudenverlauf aus den gemessenen Übertragungsfunktionen dargestellt. Auch in diesem Diagramm sind folgende vertikale Marker für die ermittelten Resonanzfrequenzen angegeben:

- $f_{0, \text{Ber}}$, rot mit 68 Hz
- $f_{0, \text{Ball}}$, blau mit 63 Hz und
- $f_{0, \text{Phase}}$, grün mit 57 Hz (die aus der Phasendifferenz-Methode bestimmte Resonanzfrequenz)

Zusätzlich ist noch der Schnittpunkt des Phasenverlaufes, bei dem die 90° Phasenverschiebung auftritt, eingetragen.

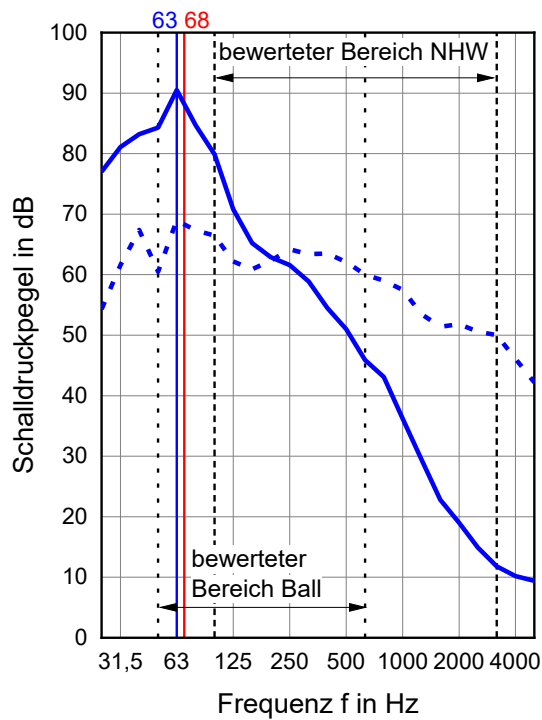


Abbildung 33: Norm-Trittschallpegel (gestrichelte Linie) und Maximal-Trittschallpegel (durchgezogene Linie) der Decke VK-ACA 4, in rot ($f_{0, \text{Ber}}$ vertikaler Marker) ist die berechnete Resonanzfrequenz und in blau ($f_{0, \text{Ball}}$ vertikaler Marker) die Resonanzfrequenz aus der Ballmessung markiert.

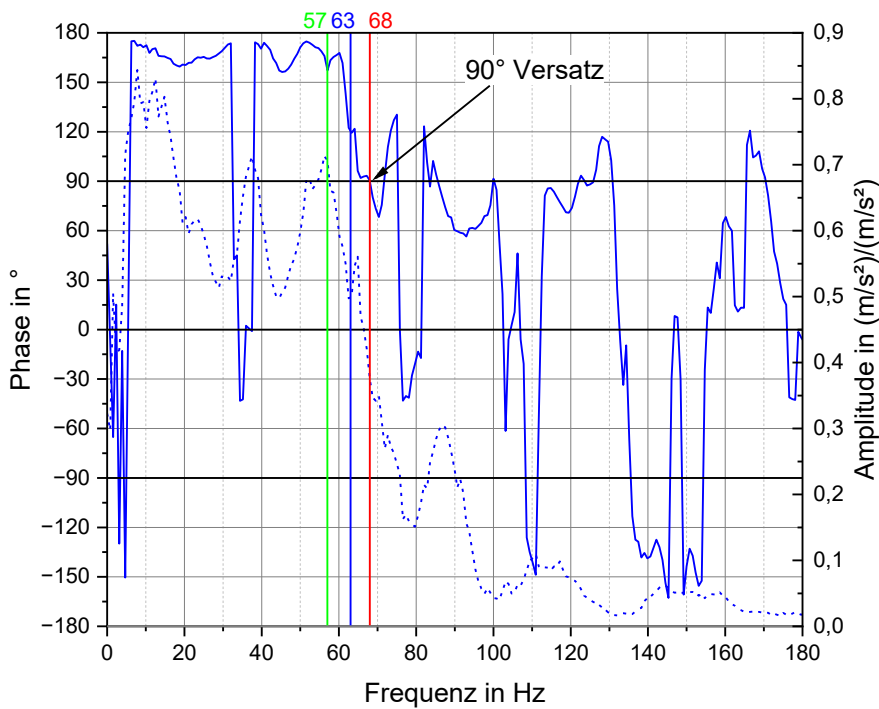


Abbildung 34: Mittelwert des Phasen- (durchgezogen) und Amplitudenverlaufes (gestrichelt) ermittelt aus den Übertragungsfunktionen der Decke VK-ACA 4

Tabelle 33 zeigt alle im Labor mit der Phasendifferenzenmethode 1 nach Tabelle 16 bzw. Abschnitt 2.1.1.1 untersuchten Decken mit den jeweils ermittelten Resonanzfrequenzen. Es ist die berechnete Resonanzfrequenz ($f_{01,Ber.}$ bzw. $f_{02,Ber.}$), die aus der japanischen Gummiballmessung abgelesene Resonanzfrequenz ($f_{0,Ball}$) und die mit der Phasendifferenz bestimmte Resonanz ($f_{0,Phase}$) angegeben. Vergleicht man im ersten Schritt die berechneten Werte mit den abgelesenen Werten aus der Ballmessung sieht man, dass es bei verschiedenen Deckenaufbauten eine gute Übereinstimmung gibt und bei anderen große Abweichungen. Im Allgemeinen zeigt sich zwischen den berechneten Werten und den Werten aus der Ballmessung bei zweischaligen Aufbauten, bei denen weiche Trittschalldämmungen (d.h. niedrige dyn. Steifen) verwendet werden, eine gute Übereinstimmung. Zur Orientierung kann dafür die Angabe der dyn. Steife von $s' \leq 10 \text{ MN/m}^3$ angesetzt werden. In diesen Fällen passt die mit der Phasendifferenz bestimmte Resonanzfrequenz auch gut zu der berechneten und der aus der Ballmessung abgelesenen Resonanzfrequenz. Im Allgemeinen liegt bei den hier untersuchten Zweimassenschwingern die ermittelte Resonanzfrequenz $f_{0,Phase}$ unter den berechneten Werten, womit man bei der Planung auf der „sicheren Seite“ liegt. Bei den hier untersuchten dreischaligen Aufbauten war die Abhängung auf der Holzbalkendecke ein extremer Fall, da die Abhängung aus einer Sparlattung bestand. In einem solchen Fall wird die Balkentiefe plus die Lattungstiefe als eine Luftfeder betrachtet und als solche berechnet. Das heißt diese Feder ist relativ „weich“ und generiert in der Berechnung eine niedrige Resonanzfrequenz, die in der Praxis mit der Direktlattung nicht erreicht werden kann. Andere Abhängesysteme wurden hier nicht untersucht. Aus derzeitiger Sicht ist die Berechnung der Resonanzfrequenz bei zweischaligen Aufbauten nach Formel 3 für Decken mit weichen Trittschalldämmungen geeignet. Bei härteren Trittschalldämmungen kann es zu schlechteren Übereinstimmungen mit den Messungen kommen. Die Gründe hierfür sind noch nicht klar. Es wird vermutet, dass u.a. nicht berücksichtigte Dämpfungseffekte in der Trittschalldämmung das Berechnungsergebnis verfälschen. Prinzipiell sind die Eingangsdaten zur Berechnung der Resonanzfrequenz von wesentlicher Bedeutung für die Aussagekraft der Berechnung.

Für die Berechnung der Resonanzfrequenzen in Tabelle 33 waren folgende Daten vorhanden:

- Flächenmasse der Rohdecke m'_D in kg/m^2
- Flächenmasse der Schüttung m'_S in kg/m^2 (die dann zu m'_2 zusammengefasst wurden)
- Flächenmasse des Estrichs m'_1 in kg/m^2 , und
- Dyn Steife s' der Trittschalldämmung (aus Datenblättern sofern angegeben)

Zur Kontrolle wurde die dyn. Steife der Trittschalldämmungen nach den Messungen auch im Labor gemessen. Für die Berechnung wurde der Wert aus dem Datenblatt benutzt, da im Allgemeinen nur dieser zur Verfügung steht. Im Fall der in situ Messungen mussten auch die Flächenmassen der einzelnen Komponenten abgeschätzt werden.

Ein Vergleich zwischen der softwarebasierten Auswertung ($f_{0,Phase,TUW}$) durch die TU Wien und der händischen Auswertung ($f_{0,Phase}$) durch die HFA in Tabelle 33 zeigt, dass die Datenqualität

durch Messmethode 1 nicht ausreichend gut ist um softwarebasiert ausgewertet werden zu können. Darauf aufbauend wurde Messmethode 2 (Tabelle 16, Abschnitt 2.1.1.3) entwickelt.

Tabelle 33: Im Labor untersuchte Deckenaufbauten und mit der Phasendifferenzenmethode ermittelte Resonanzfrequenzen

Deckenaufbau	Resonanzfrequenz in Hz					$f_{0,Phase} < f_{01,Ber.}$
	$f_{01,Ber.}$	$f_{02,Ber.}$	$f_{0,Ball}$	$f_{0,Phase}$ (Methode 1)	$f_{0,Phase,TUW}$ (Methode 1)	
VK-ACA 1	39	--	125	94	44,5	Nein
VK-ACA 2	27	147	63	42	65,3	Nein
VK-ACA 3	71	602	125	138	90,6	Nein
VK-ACA 4 (Vergleichsmes- sung mit TGM und TUG)	68	--	63	57	57,9	Ja
VK-ACA 5	128	--	63	50	17,2	Ja
VK-ACA 6	45	--	40	32	17,2	Ja
VK-ACA 7	41	--	40	34	17,9	Ja
VK-ACA 8	93	--	63	42	18,8	Ja
VK-ACA 9	107	--	63	46	21,1	Ja
VK-ACA 10	48	--	40	36	35,9	Ja
VK-ACA 11	47	--	40	33	17,9	Ja
VK-ACA 12	49	--	63	56	35,9	Nein
VK-ACA 13	66	--	63	60	56,3	Ja
VK-ACA 14	71	--	63	52	51,6	Ja
VK-ACA 15	44	--	40	36	36,7	Ja

3.1.3 Ergebnisse zur Bestimmung der Federsteifigkeiten von Abhängesystemen mit der Phasendifferenzmethode

In Abbildung 35 und Abbildung 36 sind die Phasen- und Amplitudenverläufe von 2 kleinen Deckenversuchen dargestellt (2 Messungen am selben Versuchskörper mit unterschiedlichen Anregepunkten). Es ist ersichtlich, dass gegenüber den Messungen auf einer großen Decke in einem Prüfstand deutlich weniger „Störeinflüsse“ (wie zum Beispiel Eigenmoden) vorhanden sind und sich der Phasenverlauf deutlich einfacher interpretieren lässt. Eventuell kann es in

diesem Fall sogar ausreichen nur den Amplitudenverlauf auszuwerten. Bei dieser Messung kann eine Resonanzfrequenz $f_0 = 26$ Hz abgelesen werden. Diese ist analog zu den anderen Diagrammen auch mit einem vertikalen grünen Marker eingezeichnet.

In Tabelle 34 bis Tabelle 36 sind die Ergebnisse aus den Messungen der Federsteifigkeit der Abhängesysteme zusammengefasst. Die sich daraus ergebenden Steifigkeiten passen gut zu den momentan verfügbaren Daten in der Literatur (Schödel 2018; Mecking et al. 2022; Saarinen et al. 2024). Bis auf die Daten der Holzlattung sind alle Werte nachvollziehbar. Bei der Lattung kann momentan noch nicht eingeschätzt werden welche Federsteifigkeit gemessen wird. Eventuell kann aber auch mit diesen Werten die Berechnung der Resonanzfrequenz der Unterdecken mit Holzlattung verbessert werden. In diesem Projekt konnten die ermittelten Werte leider nicht eingesetzt werden. Zum einen wurden sowohl im Prüfstand als auch bei den in situ Messungen kaum Deckenaufbauten mit Unterdecken gemessen. Zum anderen braucht man für die weitere Berechnung der Resonanzfrequenz genaue Details über das verwendete Abhängesystem. Diese Details lagen für die Baustellenmessungen nur unzureichend vor. Zukünftig wird jedenfalls die Berücksichtigung der Federsteifigkeit der Abhängesysteme bei der Berechnung der Resonanzfrequenzen empfohlen, vor allem bei sehr dicken Luftschichten.

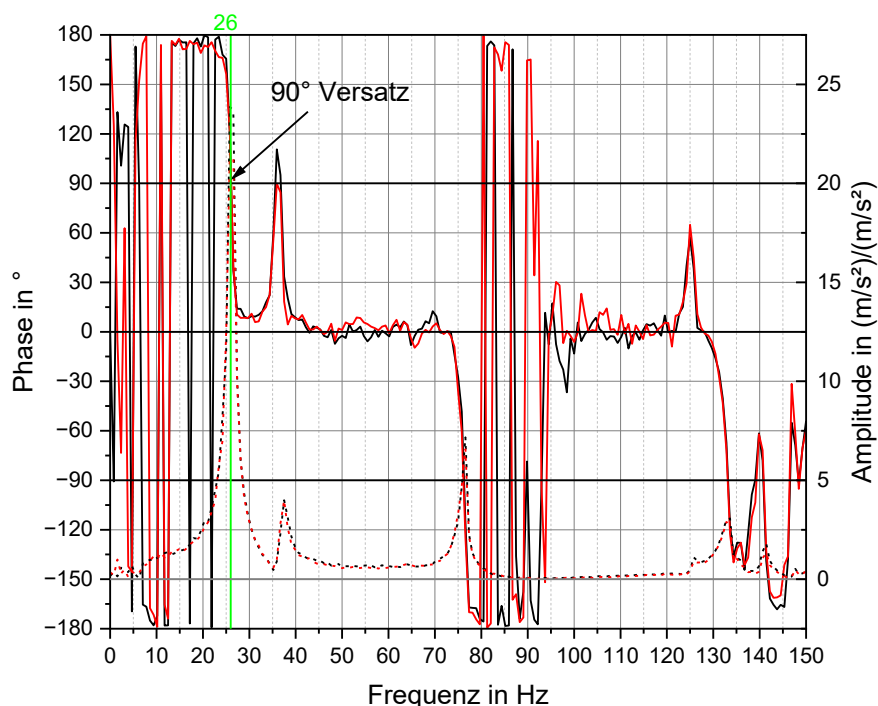


Abbildung 35: Mittelwert des Phasen- (durchgezogen) und Amplitudenverlaufes (gestrichelt) ermittelt aus den Übertragungsfunktionen einer DSA-Abhängung unter einer Betondecke (in einem Frequenzbereich bis 150 Hz). Dargestellt sind 2 Messungen (rot und schwarz) am selben Versuchskörper mit unterschiedlichen Anregepunkten.

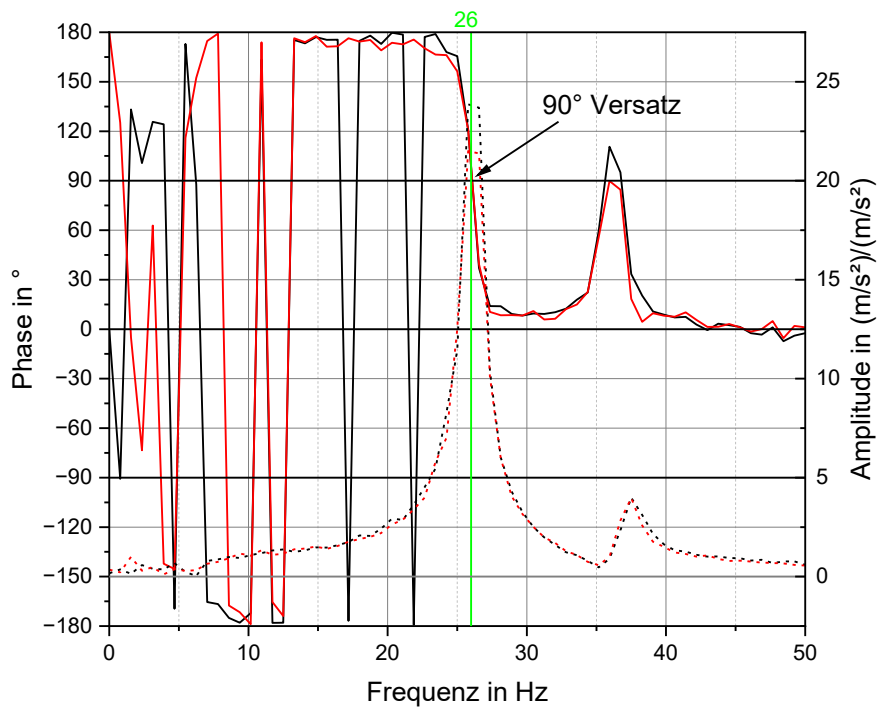


Abbildung 36: Mittelwert des Phasen- (durchgezogen) und Amplitudenverlaufes (gestrichelt) ermittelt aus den Übertragungsfunktionen einer DSA-Abhängung unter einer Betondecke (in einem Frequenzbereich bis 50 Hz). Dargestellt sind 2 Messungen (rot und schwarz) am selben Versuchskörper mit unterschiedlichen Anregepunkten.

Tabelle 34: Übersicht der bestimmten Federsteifigkeiten D der schallentkoppelten Direktschwingabhängiger unter den verschiedenen Grunddecken mit den eingestellten Abhängemassen

Schallentkoppelte Direktschwingabhängiger unter								
Brettsperrholzdecke			Betondecke			Holzbalkendecke		
m in kg	f ₀ in Hz	D in MN/m	m in kg	f ₀ in Hz	D in MN/m	m in kg	f ₀ in Hz	D in MN/m
1,2	41,5	0,084	4,3	26	0,113	4,3	22,5	0,085
3,4	32,0	0,136	6,4	22	0,122	6,4	19,5	0,096
5,5	26,0	0,146	8,5	19,5	0,128	8,5	16,5	0,091
7,6	22,5	0,152	10,6	18	0,136	10,6	15	0,094
9,7	19,5	0,146	12,8	16	0,129	12,8	13	0,085
Mittelwert		0,133			0,126			0,090

Tabelle 35: Übersicht der bestimmten Federsteifigkeiten D der elastomer Direktschwingabhänger unter den verschiedenen Grunddecken mit den eingestellten Abhängmassen

Elastomer Direktschwingabhänger unter								
Brettsperrholzdecke			Betondecke			Holzbalkendecke		
m in kg	f ₀ in Hz	D in MN/m	m in kg	f ₀ in Hz	D in MN/m	m in kg	f ₀ in Hz	D in MN/m
4,3	21	0,074	4,3	20	0,067	4,3	19,5	0,064
6,4	17	0,073	6,4	16	0,064	6,4	15,5	0,060
8,5	14	0,066	8,5	13,5	0,061	8,5	12,5	0,052
10,6	12	0,060	10,6	12	0,060	10,6	11	0,051
12,8	10	0,050	12,8	10	0,050	12,8	9	0,041
Mittelwert		0,065			0,061			0,054

Tabelle 36: Übersicht der bestimmten Federsteifigkeiten D' der Federschien unter den verschiedenen Grunddecken mit den eingestellten Abhängmassen und der Holzlattung unter der Holzbalkendecke

Federschien unter									Sparlattung unter		
Brettsperrholzdecke			Betondecke			Holzbalkendecke			Holzbalkendecke		
m_g in kg	f_0 in Hz	D' in MN/m ²	m_g in kg	f_0 in Hz	D' in MN/m ²	m_g in kg	f_0 in Hz	D' in MN/m ²	m_g in kg	f_0 in Hz	D' in MN/m ²
4,9	48	0,125	17,0	29	0,157	17,0	33,5	0,209	17,0	92	1,578
13,4	32	0,151	25,5	25	0,175	25,5	27	0,204	25,5	90	18,121
21,9	27	0,175	34,0	20	0,149	34,0	25	0,233	34,0	90	24,161
30,4	22	0,162	42,5	18	0,151	42,5	22	0,226	42,5	89	29,534
38,9	19	0,154	51,0	16,5	0,152	51,0	21	0,247	51,0	89	35,440
Mittelwert		0,153			0,157			0,224			21,767

3.2 In situ Messungen von Decken

Nachfolgend werden die Ergebnisse der in situ Messungen (Norm-Trittschallpegel und Resonanzfrequenz) in den verschiedenen Gebäuden aufgeführt und diskutiert.

Anmerkung zu den Auswertungen In-Situ 1 bis In-Situ 6 der HFA: Im Allgemeinen wird in den Diagrammen der Norm-Trittschallpegel in schwarz und der maximale Trittschallpegel in rot dargestellt. Des Weiteren sind mit vertikalen Linien die berechneten Resonanzfrequenzen $f_{0,Ber}$ (in rot), die aus den Trittschallpegeln der Ballmessungen abgelesenen Resonanzfrequenzen $f_{0,Ball}$ (in blau) und die mit der Phasendifferenzmethode (Methode 2 gem. Tabelle 16) bestimmte Resonanzfrequenz $f_{0,Phase}$ (in grün) eingezeichnet. Dieses Vorgehen soll helfen die Systematik besser zu verdeutlichen. Am Ende werden alle Werte zur Übersicht in einer Tabelle zusammengefasst.

3.2.1 Gebäude InSitu 1

Abbildung 37 zeigt die ermittelten Trittschallpegel in Gebäude 1. In diesem Gebäude wurden zwei Decken mit gleichem Aufbau aber zwei unterschiedlichen Raumgrößen gemessen:

- M1: kleiner Raum mit einem Volumen von 30,8 m³ → durchgezogene Kurven
- M2: großer Raum mit einem Volumen von 119,2 m³ → gepunktete Kurven

Für diesen Fall liegen die berechneten Resonanzfrequenzen bei $f_{01,Ber} = 29$ Hz bzw. $f_{02,Ber} = 66$ Hz. Diese sind für beide Decken gleich. Die abgelesenen Resonanzfrequenzen liegen bei $f_{0M1,Ball} = 63$ Hz und $f_{0M2,Ball} = 50$ Hz. In Abbildung 37 wurde nur $f_{0M2,Ball}$ eingetragen.

Abbildung 38 zeigt die Mittelwerte des Phasen- und Amplitudenverlaufes die aus den Übertragungsfunktionen der Messungen bestimmt wurden. In diesem Diagramm sind ebenfalls die berechneten und abgelesenen Resonanzfrequenzen eingezeichnet. Zusätzlich sind die Resonanzfrequenzen, die mit der Phasendifferenzmethode bestimmt wurden mit vertikalen grünen Markern hinterlegt. Aus den Messergebnissen wurden folgende Werte ermittelt:

- M1: $f_{0M1,Phase} = 28$ Hz
- M2: $f_{0M2,Phase} = 31$ Hz

Diese Resonanzfrequenzen passen gut zu der ersten berechneten Resonanz. Die aus der Ballmessung bestimmten Frequenzen liegen über den gemessenen. Wobei sich diese auch im Frequenzverlauf der Ballmessung erkennen lassen. Es wurde versucht immer den Punkt zu lokalisieren bei dem eindeutig der Bereich der Mehrschaligkeit zu wirken beginnt. Bei in situ Deckensystem kommen jedoch unterschiedliche Effekte zum Tragen, die eine eindeutige Bestimmung nicht immer ermöglichen.

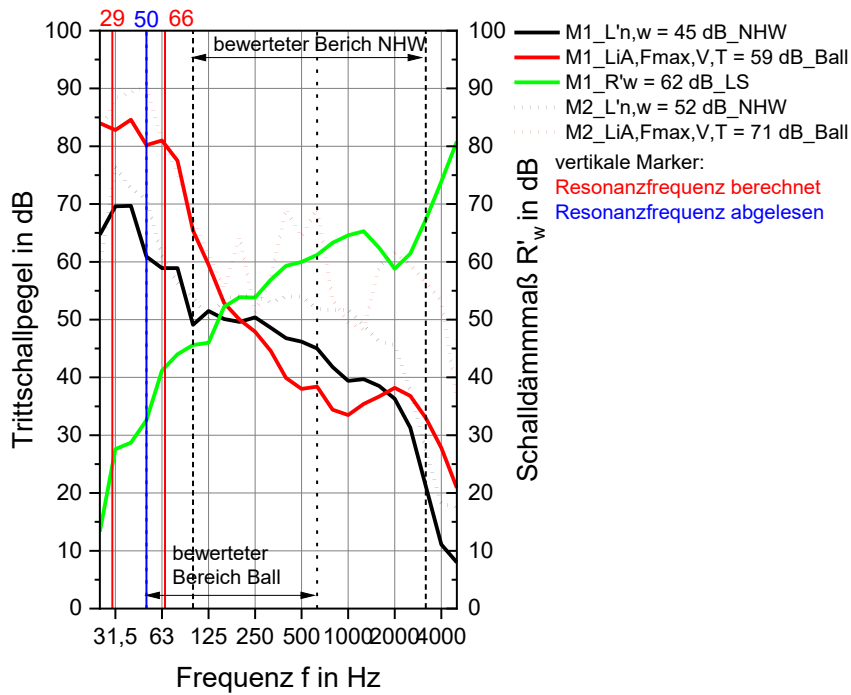


Abbildung 37: Trittschallpegel und Schalldämmmaß der Decke in Gebäude 1

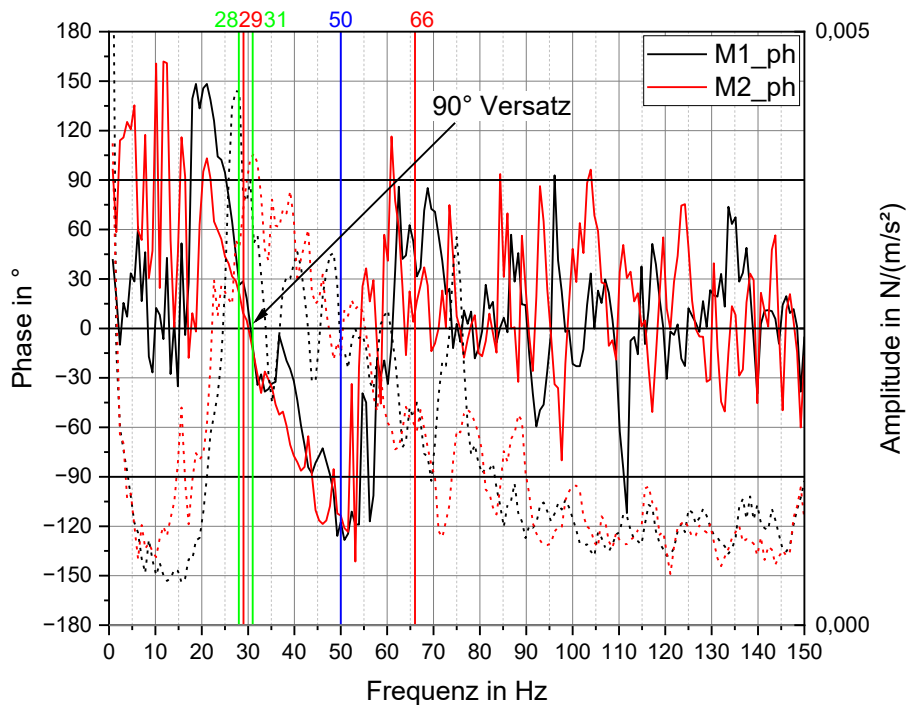


Abbildung 38: Mittelwert des Phasen- (durchgezogen) und Amplitudenverlaufes (gestrichelt) ermittelt aus der Übertragungsfunktion in Gebäude 1

3.2.2 Gebäude InSitu 2

Abbildung 39 zeigt die ermittelten Trittschallpegel in Gebäude 2. In diesem Gebäude wurden zwei Decken mit gleichem Aufbau aber zwei unterschiedlichen Raumgrößen gemessen:

- M3: großer Raum mit einem Volumen von 117 m^3 → gestrichelte Kurven
- M4: kleiner Raum mit einem Volumen von $30,5 \text{ m}^3$ → durchgezogene Kurven

Für diesen Fall liegt die berechnete Resonanzfrequenz bei $f_{01,\text{Ber}} = 58 \text{ Hz}$. Diese ist für beide Decken gleich. Die abgelesenen Resonanzfrequenzen liegen bei $f_{0M3,\text{Ball}} = 50 \text{ Hz}$ und $f_{0M4,\text{Ball}} = 50 \text{ Hz}$.

Abbildung 40 zeigt die Mittelwerte des Phasen- und Amplitudenverlaufes die aus den Übertragungsfunktionen der Messungen bestimmt wurden. In diesem Diagramm sind ebenfalls die berechneten und abgelesenen Resonanzfrequenzen eingezeichnet. Zusätzlich sind die Resonanzfrequenzen, die mit der Phasendifferenzmethode bestimmt wurden mit vertikalen grünen Markern hinterlegt. Aus den Messergebnissen wurden folgende Werte ermittelt:

- M3: $f_{0M3,\text{Phase}} = 46 \text{ Hz}$
- M4: $f_{0M4,\text{Phase}} = 48 \text{ Hz}$

Diese Resonanzfrequenzen liegen im Bereich der berechneten Resonanz. Der berechnete Wert ist größer als die gemessenen Werte.

Die aus der Ballmessung bestimmten Frequenzen passen gut zu den Phasendifferenzmessungen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass alle hier bestimmten Werte innerhalb eines akzeptablen Bereichs übereinstimmen.

Generell gilt für die Ballmessungen, dass es sich bei den abgelesenen Werten um eine Terzbandmittenfrequenz handelt, die einen Frequenzbereich angibt.

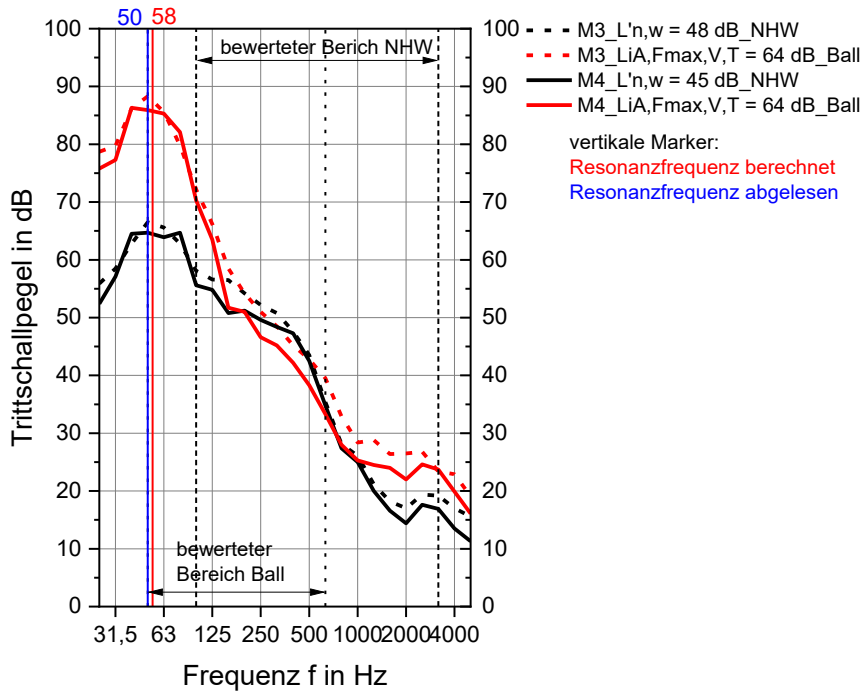


Abbildung 39: Trittschallpegel der Decke in Gebäude 2

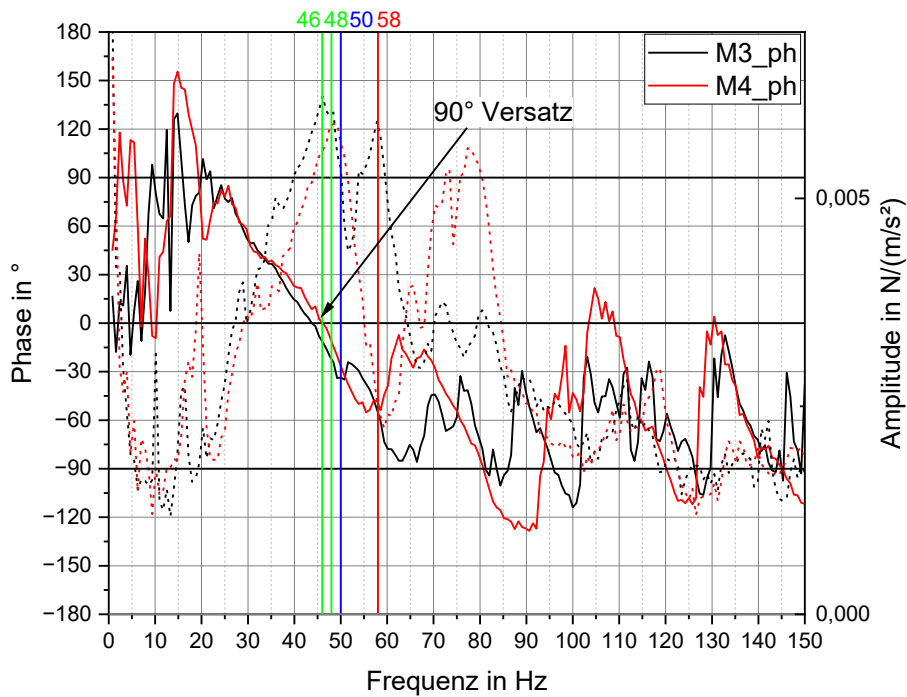


Abbildung 40: Mittelwert des Phasen- (durchgezogen) und Amplitudenverlaufes (gestrichelt) ermittelt aus der Übertragungsfunktion in Gebäude 2

3.2.3 Gebäude InSitu 3

Abbildung 41 zeigt die ermittelten Trittschallpegel in Gebäude 3. In diesem Gebäude wurden eine Decke gemessen:

- M5: kleiner Raum mit einem Volumen von $32,8 \text{ m}^3$ → durchgezogene Kurven

Für diesen Fall liegen die berechneten Resonanzfrequenzen bei $f_{01,\text{Ber}} = 62 \text{ Hz}$ bzw. $f_{02,\text{Ber}} = 86 \text{ Hz}$. Die aus der Ballmessung abgelesene Resonanzfrequenz liegt bei $f_{0\text{M5, Ball}} = 50 \text{ Hz}$.

Abbildung 42 zeigt die Mittelwerte des Phasen- und Amplitudenverlaufes die aus den Übertragungsfunktionen der Messungen bestimmt wurden. In diesem Diagramm sind ebenfalls die berechneten und abgelesenen Resonanzfrequenzen eingezeichnet. Zusätzlich sind die Resonanzfrequenzen, die mit der Phasendifferenzmethode bestimmt wurden mit vertikalen grünen Markern hinterlegt. Aus den Messergebnissen wurde folgender Wert ermittelt:

- M5: $f_{0\text{M5, Phase}} = 42 \text{ Hz}$

Diese gemessene Resonanzfrequenz liegt 20 Hz unter der berechneten Resonanzfrequenz. Die berechnete Frequenz ist somit größer als die gemessene Frequenz.

Die aus der Ballmessung bestimmte Frequenz liegt ca. eine Terzbreite über der Phasendifferenzmessung. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass alle hier bestimmten Werte für die erste Resonanzfrequenz in einem vertretbaren Bereich übereinstimmen.

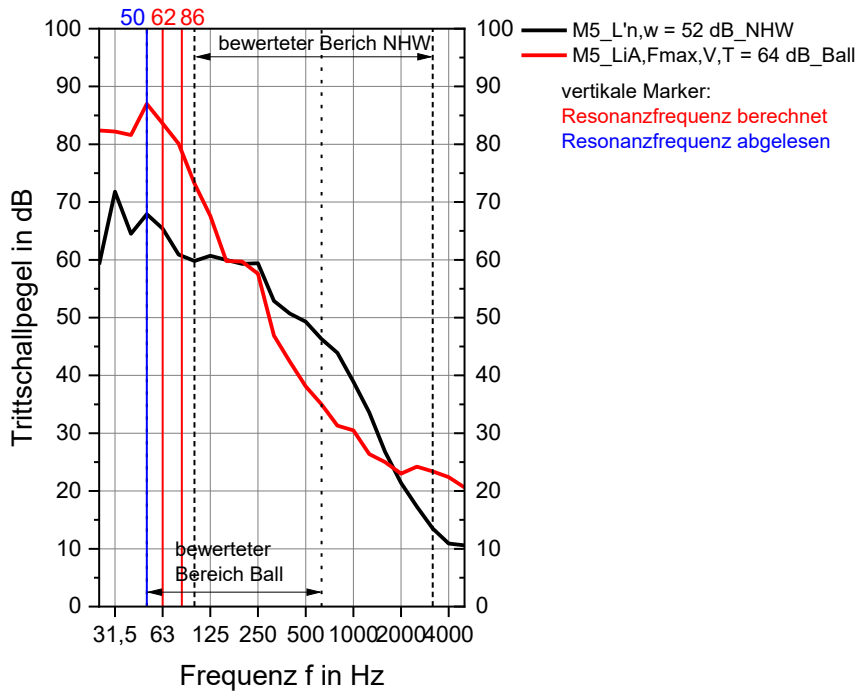


Abbildung 41: Trittschallpegel der Decke in Gebäude 3

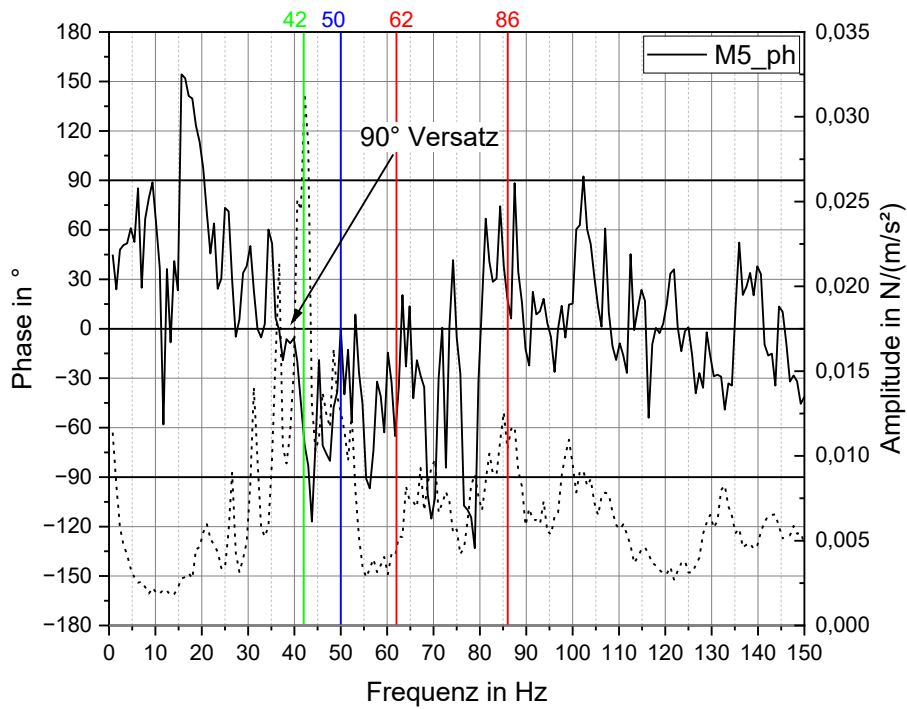


Abbildung 42: Mittelwert des Phasen- (durchgezogen) und Amplitudenverlaufes (gestrichelt) ermittelt aus der Übertragungsfunktion in Gebäude 3

3.2.4 Gebäude InSitu 4

Abbildung 43 zeigt die ermittelten Trittschallpegel in Gebäude 4. In diesem Gebäude wurde eine Decke gemessen:

- M6: kleiner Raum mit einem Volumen von 39,9 m³ → durchgezogene Kurven

Für diesen Fall liegt die berechnete Resonanzfrequenz bei $f_{01,Ber} = 48$ Hz. Die abgelesene Resonanzfrequenz liegt bei $f_{0M6,Ball} = 40$ Hz.

Abbildung 44 zeigt die Mittelwerte des Phasen- und Amplitudenverlaufes die aus den Übertragungsfunktionen der Messungen bestimmt wurden. In diesem Diagramm sind ebenfalls die berechneten und abgelesenen Resonanzfrequenzen eingezeichnet. Zusätzlich sind die Resonanzfrequenzen, die mit der Phasendifferenzmethode bestimmt wurden mit vertikalen grünen Markern hinterlegt. Aus den Messergebnissen wurde folgender Wert ermittelt:

- M6: $f_{0M5,Phase} = 35$ Hz

Diese Resonanzfrequenz liegt 13 Hz unter der berechneten Resonanz. Das heißt die Berechnung ist größer als die gemessene Frequenz.

Die aus der Ballmessung bestimmte Frequenz liegt ca. eine Terzbreite über der gemessenen Variante. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass alle hier bestimmten Werte in einem vertretbaren Bereich übereinstimmen.

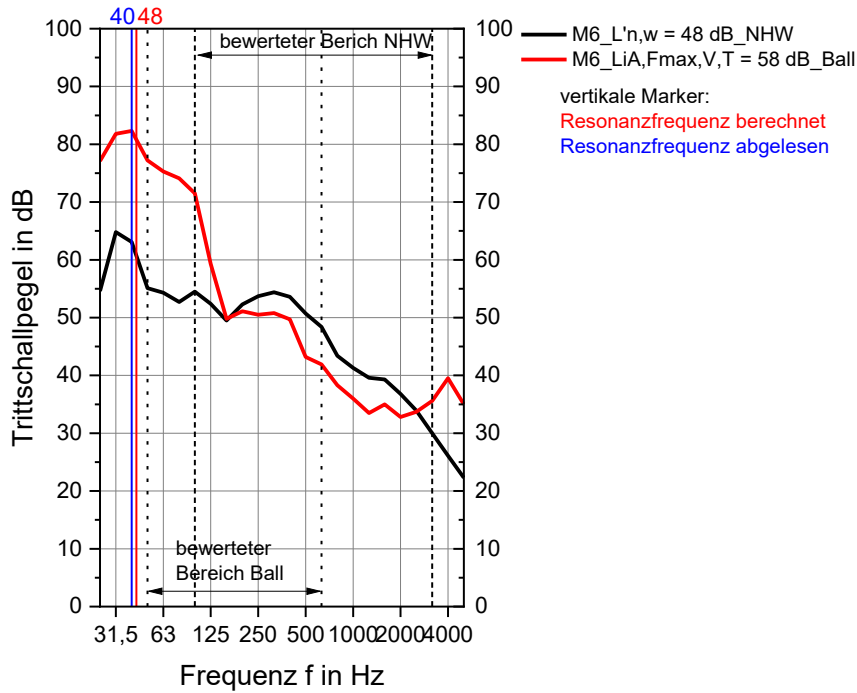


Abbildung 43: Trittschallpegel der Decke in Gebäude 4

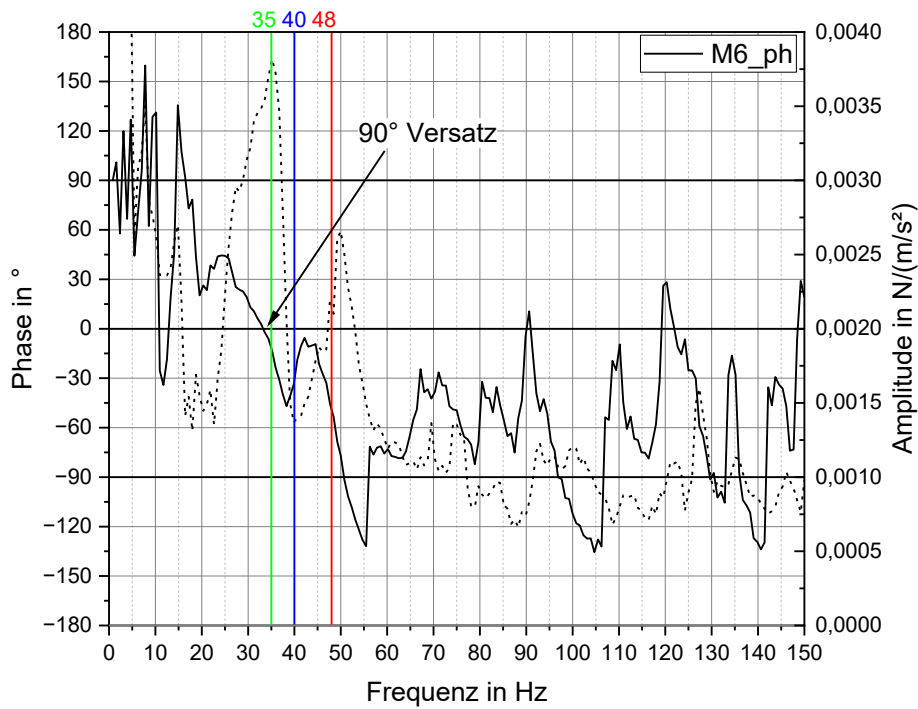


Abbildung 44: Mittelwert des Phasen- (durchgezogen) und Amplitudenverlaufes (gestrichelt) ermittelt aus der Übertragungsfunktion in Gebäude 4

3.2.5 Gebäude InSitu 5

3.2.5.1 Auswertung HFA

Abbildung 45 zeigt die ermittelten Trittschallpegel in Gebäude 5. In diesem Gebäude wurden zwei Decken mit gleichem Aufbau aber zwei unterschiedlichen Raumgrößen gemessen:

- M8: kleiner Raum mit einem Volumen von $34,2 \text{ m}^3$ → durchgezogene Kurven
- M9: großer Raum mit einem Volumen von $61,0 \text{ m}^3$ → gestrichelte Kurven

Für diesen Fall liegen die berechneten Resonanzfrequenzen bei $f_{01,\text{Ber}} = 25 \text{ Hz}$ bzw. $f_{02,\text{Ber}} = 66 \text{ Hz}$. Diese sind für beide Decken gleich. Die abgelesenen Resonanzfrequenzen liegen bei $f_{0\text{M}8,\text{Ball}} = 40 \text{ Hz}$ und $f_{0\text{M}9,\text{Ball}} = 50 \text{ Hz}$. In Abbildung 45 wurde nur $f_{0\text{M}9,\text{Ball}}$ eingetragen.

Abbildung 46 zeigt die Mittelwerte des Phasen- und Amplitudenverlaufes die aus den Übertragungsfunktionen der Messungen bestimmt wurden. In diesem Diagramm sind ebenfalls die berechneten und abgelesenen Resonanzfrequenzen eingezeichnet. Zusätzlich sind die Resonanzfrequenzen, die mit der Phasendifferenzmethode bestimmt wurden mit vertikalen grünen Markern hinterlegt. Aus den Messergebnissen wurden folgende Werte ermittelt:

- M8: $f_{0\text{M}8,\text{Phase}} = 31 \text{ Hz}$
- M9: $f_{0\text{M}9,\text{Phase}} = 36 \text{ Hz}$

Diese Resonanzfrequenz liegt 6 Hz bzw. 11 Hz über der berechneten Resonanz. Das heißt die Berechnung ist kleiner als die gemessene Frequenz.

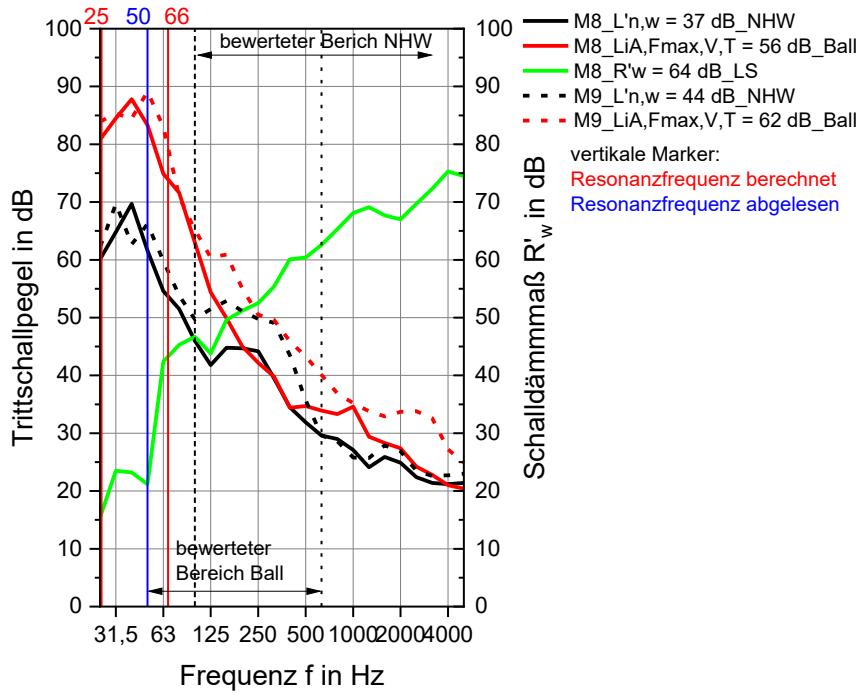


Abbildung 45: Trittschallpegel und Schalldämmmaß der Decke in Gebäude 5

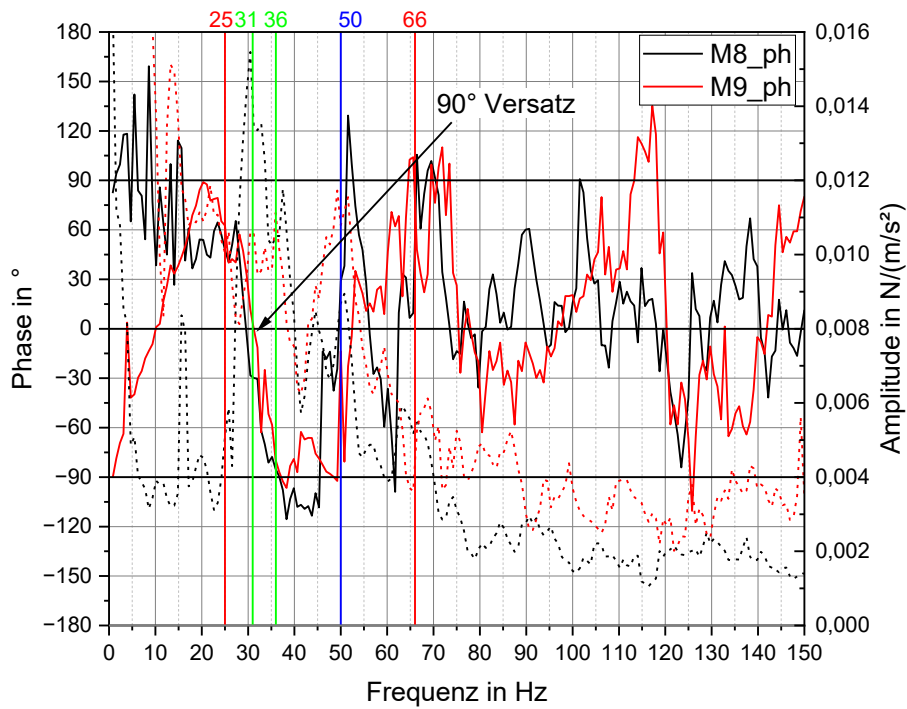


Abbildung 46: Mittelwert des Phasen- (durchgezogen) und Amplitudenverlaufes (gestrichelt) ermittelt aus der Übertragungsfunktion in Gebäude 5

3.2.5.2 Auswertung TGM

Vor den Messungen wurden zum besseren Verständnis der Resonanzeffekte sowie zur Abschätzung des bei den Messungen zu untersuchenden Frequenzbereichs Prognoserechnungen durchgeführt. Dabei kamen im Wesentlichen vier Gleichungen zur Anwendung. Für die Prognose der Resonanzfrequenz des Estrichs wurden die Gleichungen X1 und X2 eingesetzt:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{s}{m_1 \cdot m_2} \right)} \quad (\text{X1})$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{s}{m_1} \right)} \quad (\text{X2})$$

Gleichung X2 wurde informativ eingesetzt, da ein Zusammenwirken beider Massen des Deckensystems erwartet wird. Es werden im Folgenden einzelne Abschnitte des Deckenaufbaus betrachtet:

Masse-Feder-Masse-Resonanz des Estrichs: Hier ist m_1 die flächenbezogene Masse des Estrich allein und m_2 jene des restlichen Deckenaufbaus, wobei die nicht flächigen Konstruktionsteile wie Holzträger und Federschienen nicht berücksichtigt werden. Als Feder wurde die dynamische Steifigkeit der Trittschall-Dämmplatte eingesetzt.

Das Ergebnis der informativ eingesetzten Gleichung X2 ist nicht mit den Messergebnissen vergleichbar, sie dient nur der Prognose des Masse-Feder-Masse-Systems des Estrichs. Dieser Rechenwert ist untenstehend in Klammern angegeben. Zur Berücksichtigung der Masse-Luft-Masse-Resonanz, welche in mehrlagigen Systemen auftreten kann, wurde Gleichung X3 eingesetzt.

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_0}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (\text{X3})$$

Masse-Feder-Masse-Resonanz der abgehängten Decke: Die dafür prognostizierte Resonanzfrequenz ist die niedrigst mögliche der abgehängten Decke, da die Steifigkeit der Aufhängung vernachlässigt wird. Es wird nur die Steifigkeit der Luft eingesetzt. Hier ist m_2 die flächenbezogene Masse der abgehängten Decke allein und m_1 jene des restlichen darüber befindlichen Deckenaufbaus. Nicht flächige Konstruktionsbestandteile wurden vernachlässigt. In der Gleichung X3 ist c_0 die Schallgeschwindigkeit in Luft und ρ_0 die Dichte der Luft.

Mit Gleichung X4 wird eine mögliche Stehwellenresonanz des Luftspalts der abgehängten Decke ermittelt. Hier geht die Schallgeschwindigkeit in Luft und die Abmessung des Spaltes ein.

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi \cdot d} \quad (\text{X4})$$

Damit können aus den Bauteilangaben vorab Resonanzfrequenzen für einzelne Abschnitte des Deckenaufbaus rechnerisch abgeschätzt werden wie folgt:

Fußbodenaufbau:	$f_0 \approx 62$ (48,4) Hz
abgehängte Decke, Stehwellenresonanz des Luftspaltes:	$f_0 \approx 227$ Hz
abgehängte Decke, Masse–Feder–Masse-Resonanz:	$f_0 \approx 21$ Hz

In der nachfolgenden Tabelle sind die ermittelten Einzahlwerte zusammengestellt:

	Wohnungspaar 1 (21 m ²)	Wohnungspaar 2 (13 m ²)
$L'_{nT,w}$ [dB]	39	36
C_l [dB]	0	-0
$C_{l\ 50-2500}$ [dB]	8	7
$L'_{iA,Fmax,V,T}$ [dB]	47	41

In den nachfolgenden Diagrammen ist links der Standard-Trittschallpegel und rechts der maximale Norm-Trittschallpegel der beiden in der Abbildung 28 dargestellten Decken in der Terzbandanalyse graphisch dargestellt:

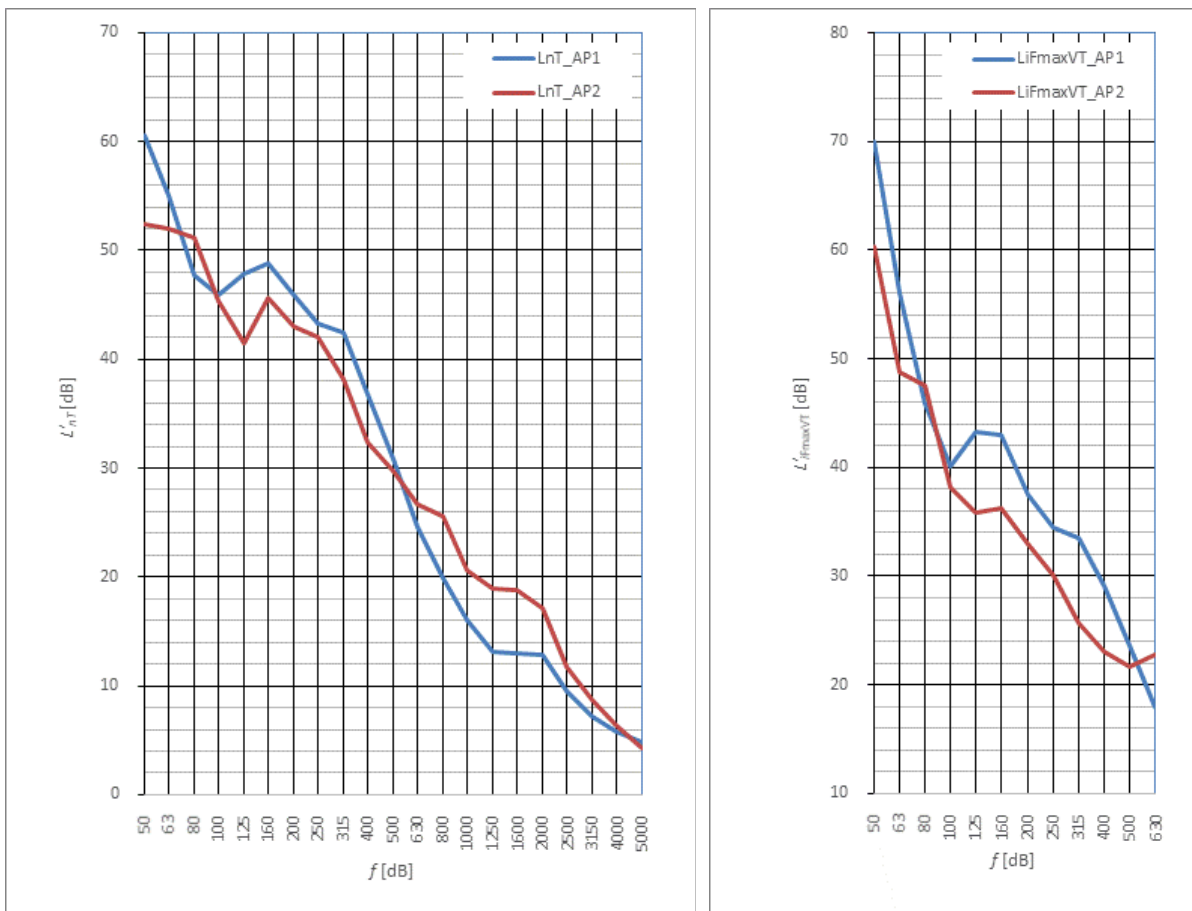


Abbildung 47: Messergebnisse nach EN ISO 16283-2

Der Vergleich der Einzulangaben in der Tabelle zeigt, dass bei den beiden gleichartig aufgebauten Decken jene mit der geringeren Fläche günstigere Ergebnisse bewirkt. Ebenso fällt der maximale A-bewertete Norm-Trittschallpegel der geometrisch kleineren Decke deutlich günstiger aus.

Um das Verhalten der Decke im tiefen Frequenzbereich betrachten zu können, ist in der nachfolgenden Graphik, obwohl Messungen des Schalldruckpegels in Räumen in diesem niedrigen Frequenzbereich sehr unsicher sind, experimentell der maximale Schalldruckpegel im Frequenzbereich ab 8 Hz bei Impulsanregung jenem des Umgebungsgeräusches gegenübergestellt:

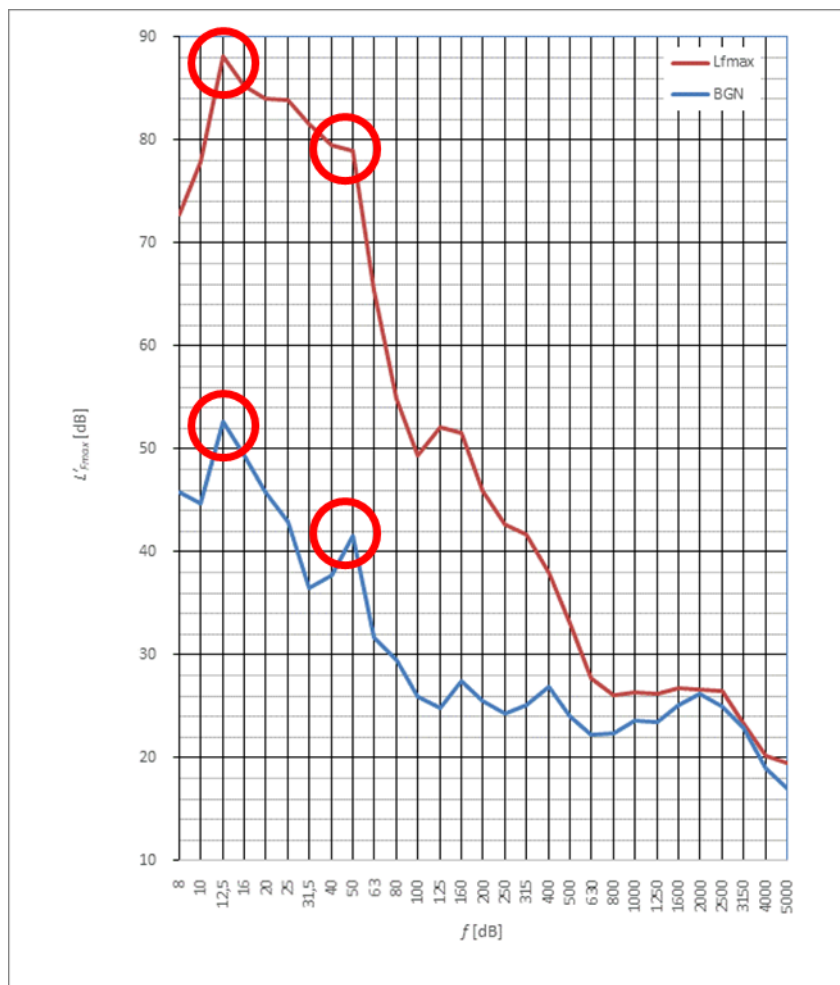


Abbildung 48: Vergleich maximaler Schalldruckpegel bei Impulsanregung gegenüber Umgebungsgeräusch im Wohnungspaar 1

Dabei ist auffällig, dass die sichtbaren Pegelspitzen in den Terzbändern 12,5 Hz und 50 Hz, welche vorerst als durch die Resonanz der Decke verursacht erscheinen können, in der Terzbandanalyse des Umgebungsgeräusches ebenso vorhanden sind. Sie können daher einerseits durch den teilweisen Eintrag des Umgebungsgeräusches über Körperschall durch die Decke, aber auch durch die Raumakustik oder letztlich durch eine Wechselwirkung zwischen diesen beiden Komponenten verursacht sein.

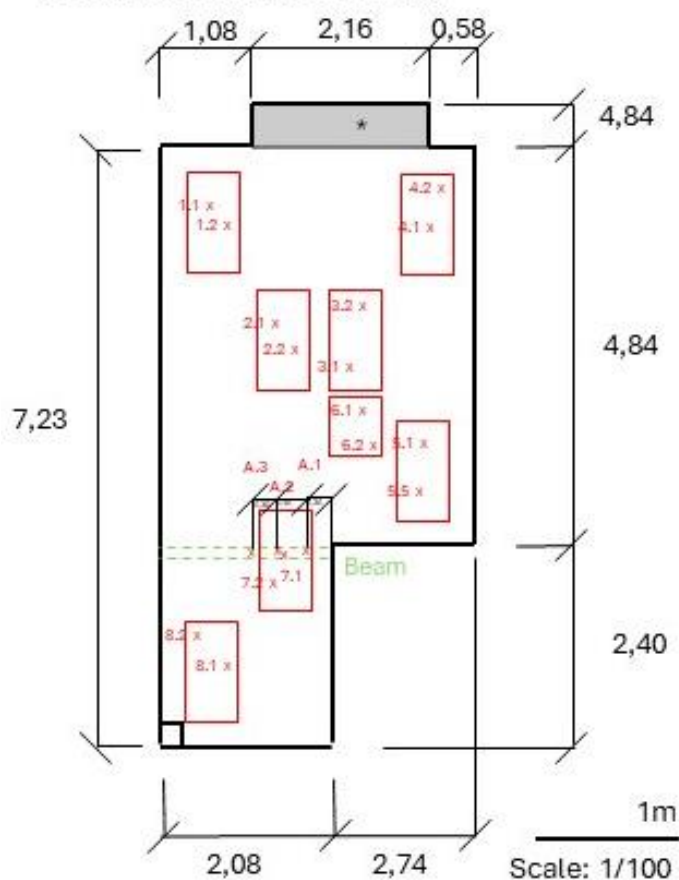
Ermittlung der Masse-Feder-Masse-Resonanzfrequenz f_0 :

Die Versuche zur Ermittlung der Resonanzfrequenz der Decke erfolgten mit Anregung durch einen Impulshammer (Type PCB 086C03) und alternativ mit Anregung durch den Gummiball (Type Svantek SP 95). Dabei wurde die Übertragungsfunktion einmal zwischen dem Kraftsignal des den Fußboden anregenden Impulshammers und einem an der abgehängten Decke montierten Beschleunigungsaufnehmer und einmal zwischen zwei auf dem Fußboden und an der abgehängten Decke sowie an einem Holzbalken jeweils gegenüberliegend angebrachten Beschleunigungsaufnehmern (Type MMF KS878C mit DAQ NI cDAQ-9185 + NI9234) ermittelt. Im letzteren Fall wurde getrachtet, soweit praktisch möglich in der Nähe des

auf dem Fußboden befindlichen Aufnehmers anzuregen. Die Auswertung der aufgezeichneten Signalverläufe erfolgte auf Ebene des Computersystems MATLAB mittels FFT mit Hanning-Fenster bei einer Abtastrate von 51200 Hz über 5 Mittelungen je Messposition.

In der Praxis erweist es sich als schwierig, die beiden ober- und unterhalb der Decke befindlichen Positionen in einer Linie anzulegen. Es wurden die Markierungen der Messpositionen vom Projektpartner HFA übernommen. Die Grundrisszeichnung der untersuchten Decke mit den Anregungspunkten ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

Resonance frequency measurement positions
(Sketch, no distances measured, but same positions at Holzforschung)



* Only in apartment 12, not in 5

Abbildung 49: Messpunkte für die Messungen der Resonanzfrequenz

In der Darstellung ist auch der Holzbalken, an welchem ebenso die Beschleunigung gemessen wurde, eingezeichnet. Nachfolgend sind Beispiele der an der abgehängten Decke und an einem Holzbalken montierten Beschleunigungsaufnehmer photographisch abgebildet:



Abbildung 50: Beschleunigungsaufnehmer an der abgehängten Decke und am Holzbalken

In den nachfolgenden 3 Diagrammen sind die Übertragungsfunktion, der Phasengang und die Kohärenz bei Anregung mit dem **Impulshammer** in Abhängigkeit von der Frequenz graphisch dargestellt:

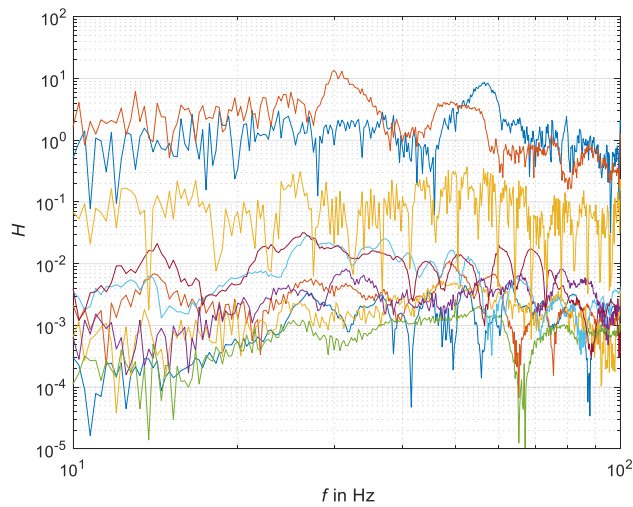


Abbildung 51: Übertragungsfunktion bei Anregung mit Impulshammer, durch Messbereichsuntergrenze beeinflusst

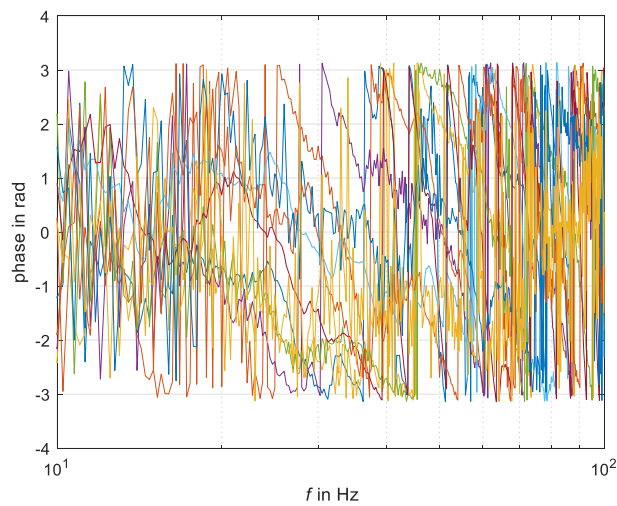


Abbildung 52: Phasengang bei Anregung mit Impulshammer, durch Messbereichsuntergrenze beeinflusst

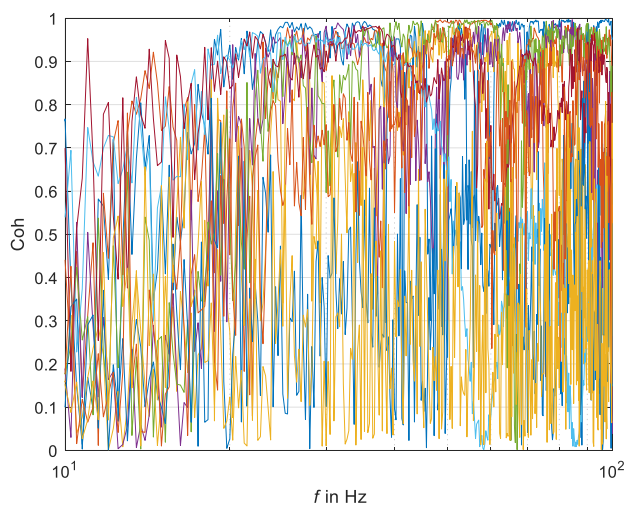


Abbildung 53: Kohärenz bei Anregung mit Impulshammer, durch Messbereichsuntergrenze beeinflusst

Die Versuche mit Anregung durch den Impulshammer zeigten, dass im Fall einer Decke von guter schalltechnischer Qualität die mit dem vergleichsweise leichten Hammer erzielbare Anregungskraft zu gering ist, um an der abgehängten Decke Beschleunigungswerte mit ausreichendem Störabstand zu bewirken. Diese Messergebnisse werden daher nicht weiter betrachtet.

In den nachfolgenden 3 Diagrammen sind die Übertragungsfunktion der Beschleunigung Unterseite/Oberseite, der Phasengang und die Kohärenz bei Anregung mit dem **Gummiball** in Abhängigkeit von der Frequenz graphisch dargestellt:

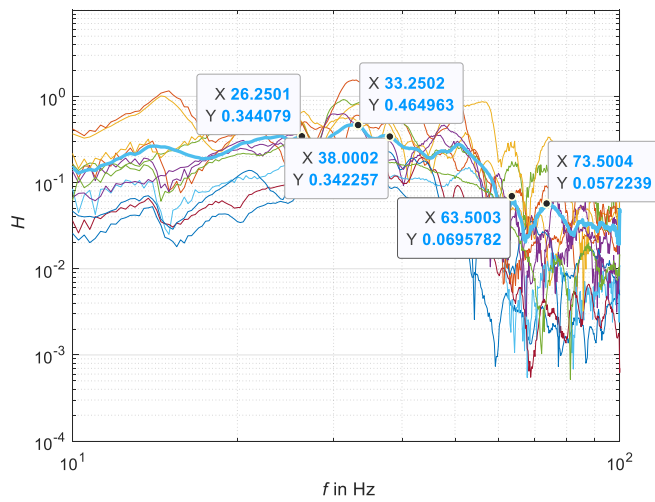


Abbildung 54: Übertragungsfunktion bei Anregung mit Gummiball, Mittelung über die Messpunkte an der abgehängten Decke in dicker Linie eingezeichnet

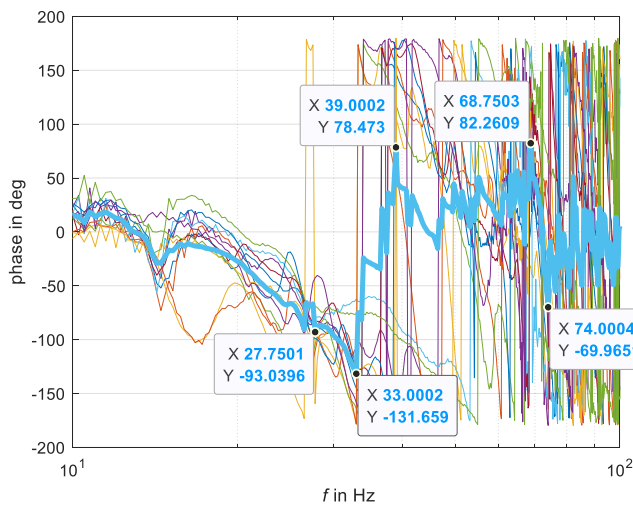


Abbildung 55: Phasengang bei Anregung mit Gummiball, Mittelung über die Messpunkte an der abgehängten Decke in dicker Linie eingezeichnet

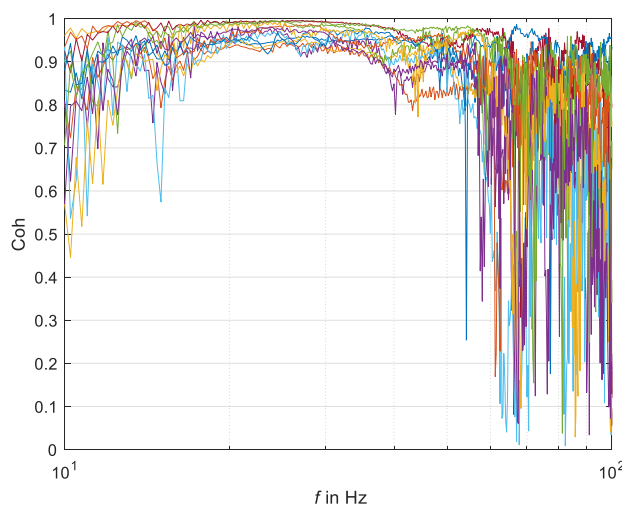


Abbildung 56: Kohärenz bei Anregung mit Gummiball

In den folgenden 3 Diagrammen sind die auf dem Holzbalken ermittelten Ergebnisse dem Mittelwert der Ergebnisse für die abgehängte Decke gegenübergestellt:

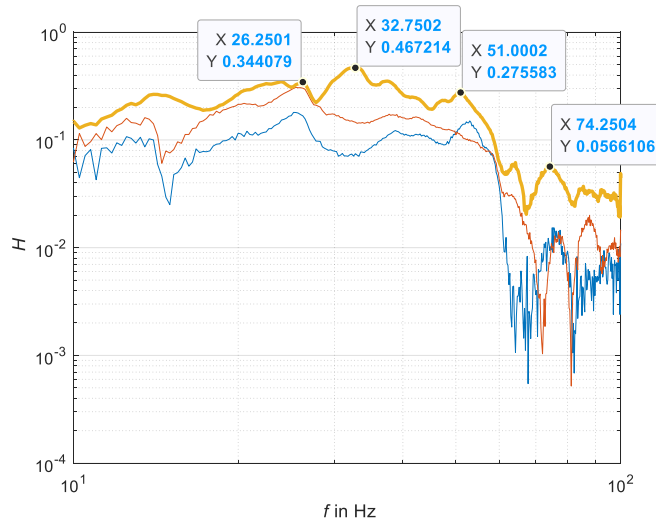


Abbildung 57:
Übertragungsfunktion zur
abgehängten Decke (Mittel,
dicke Linie) und zum
Holzbalken (2 MP, dünne
Linien)

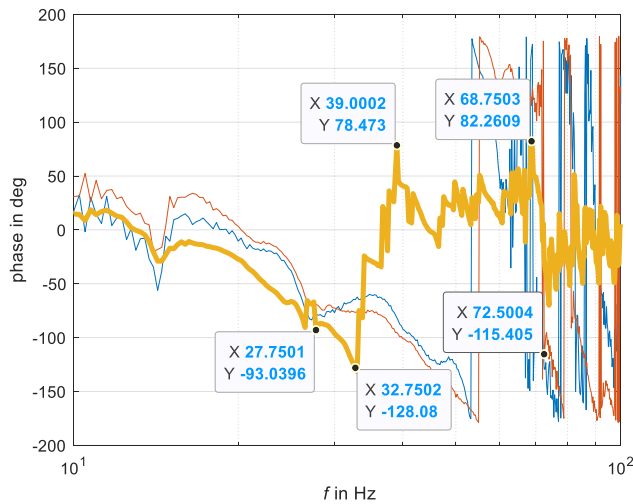


Abbildung 58: Phasengang
zur abgehängten Decke
(Mittel, dicke Linie) und zum
Holzbalken (2 MP, dünne
Linien)

Mit Bedachtnahme auf die rechnerisch abgeschätzten Resonanzfrequenzen wird der Phasengang auch im Frequenzbereich von 100 Hz bis 300 Hz dargestellt:

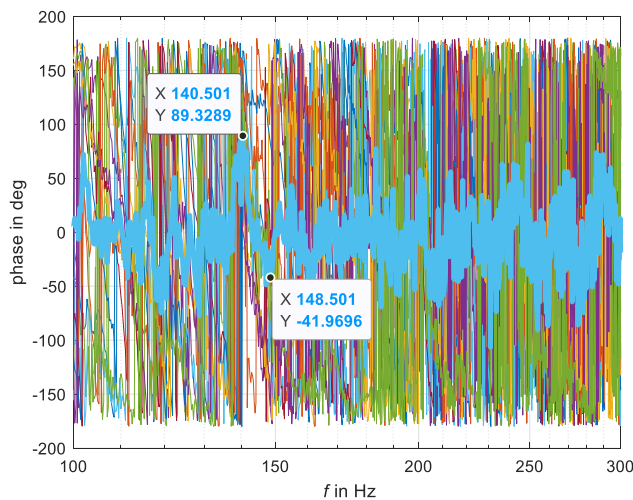


Abbildung 59: Phasengang
im Frequenzbereich 100 Hz
bis 300 Hz

Erkenntnisse:

Für die Untersuchung von schalltechnisch günstigen Decken mit niedrigem Trittschallpegel ist eine entsprechend hohe Anregungskraft erforderlich, welche mit einem üblichen Impulshammer nicht immer erreicht werden kann.

Besonders an Deckenkonstruktionen mit abgehängten Decken ist es schwierig, eindeutige Frequenzspitzen in der Übertragungsfunktion zu finden. Eine rechnerische Prognose zur Orientierung ist dabei hilfreich bzw. erforderlich.

In den oben dargestellten Frequenzspektren sind jeweils mehrere Resonanzbereiche erkennbar. Nach der 90°-Regel wurden zwei Resonanzen im niedrigen Frequenzbereich festgestellt (Abbildung 58 und Abbildung 59). Zieht man auch das Maximum in der Transferfunktion in Betracht, so kann die Spitze bei 33 Hz als Masse-Feder-Masse-Resonanz verstanden werden. Im Vergleich mit den berechneten Prognosewerten kann dies die Resonanzfrequenz der abgehängten Decke sein.

Nach derselben Vorgangsweise findet sich bei Betrachtung des Phasengangs auch eine Resonanz im Bereich zwischen 68 Hz und 73 Hz, welchem in der Transferfunktion eine Spitze bei 74 Hz zugeordnet werden kann¹. Diese kann durch die Masse-Feder-Masse-Resonanz des Fußbodenaufbaus bewirkt sein.

Obwohl sich im Bereich um 148 Hz ein Phasensprung zeigt, kann die als Stehwellen-Resonanz des Luftraums der abgehängten Decke prognostizierte Resonanzfrequenz messtechnisch nicht nachgewiesen werden. Die Messdaten für diesen Frequenzbereich konnten nicht ausgewertet werden.

¹ Abweichungen ergeben sich durch die Ablesegenauigkeit aus den Graphen.

3.2.6 Gebäude InSitu 6

3.2.6.1 Auswertung HFA

Abbildung 60 zeigt die ermittelten Trittschallpegel in Gebäude 6. In diesem Gebäude wurde eine Decke gemessen:

- M10: kleiner Raum mit einem Volumen von $30,5 \text{ m}^3$ → durchgezogene Kurven

Für diesen Fall liegen die berechneten Resonanzfrequenzen bei $f_{01,\text{Ber}} = 35 \text{ Hz}$ bzw. $f_{02,\text{Ber}} = 235 \text{ Hz}$. Die abgelesenen Resonanzfrequenzen liegen bei $f_{0\text{M}10,\text{Ball}} = 63 \text{ Hz}$ oder eventuell bei $f_{0\text{M}10,\text{Ball}2} = 100 \text{ Hz}$. In Abbildung 60 wurde nur $f_{0\text{M}10,\text{Ball}}$ eingetragen.

Abbildung 61 zeigt die Mittelwerte des Phasen- und Amplitudenverlaufes die aus den Übertragungsfunktionen der Messungen bestimmt wurden. In diesem Diagramm sind ebenfalls die berechneten und abgelesenen Resonanzfrequenzen eingezeichnet. Zusätzlich sind die Resonanzfrequenzen, die mit der Phasendifferenzmethode bestimmt wurden mit vertikalen grünen Markern hinterlegt. Aus den Messergebnissen wurde folgender Wert ermittelt:

- M10: $f_{0\text{M}10,\text{Phase}} = 71 \text{ Hz}$

Diese Resonanzfrequenz liegt 36 Hz über der berechneten Resonanz. Das heißt die Berechnung ist kleiner als die gemessene Frequenz.

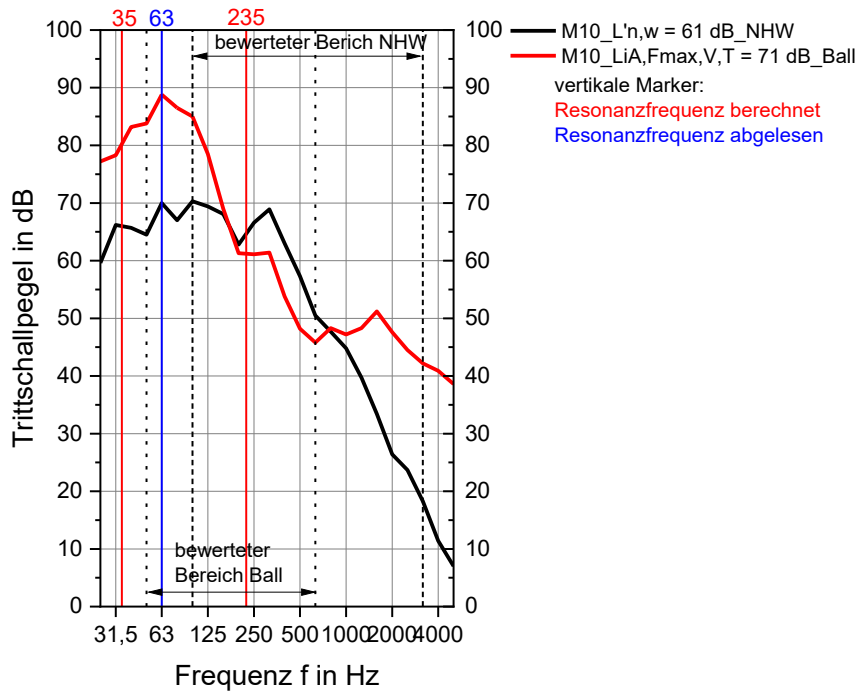


Abbildung 60: Norm- und Maximal-Trittschallpegel der Decke in Gebäude 6

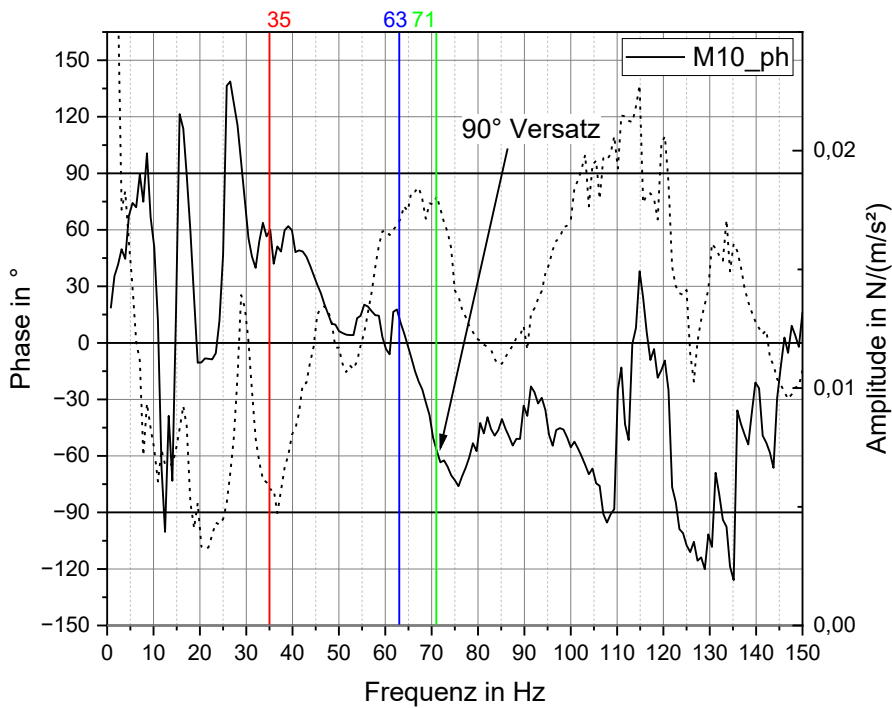


Abbildung 61: Mittelwert des Phasen- (durchgezogen) und Amplitudenverlaufes (gestrichelt) ermittelt aus der Übertragungsfunktion in Gebäude 6

3.2.6.2 Auswertung TGM

Aus den Bauteilangaben können in gleicher Weise wie unter Abschnitt 3.2.5.2 beschrieben vorab Resonanzfrequenzen für einzelne Abschnitte des Deckenaufbaus rechnerisch abgeschätzt werden wie folgt:

Fußbodenaufbau:	$f_0 \approx 140$ (80) Hz
abgehängte Decke, Stehwellenresonanz des Luftspaltes:	$f_0 \approx 195$ Hz
abgehängte Decke, Masse–Feder–Masse-Resonanz:	$f_0 \approx 23$ Hz

In den nachfolgenden 3 Diagrammen sind die Übertragungsfunktion, der Phasengang und die Kohärenz bei Anregung mit dem **Impulshammer** in Abhängigkeit von der Frequenz graphisch dargestellt:

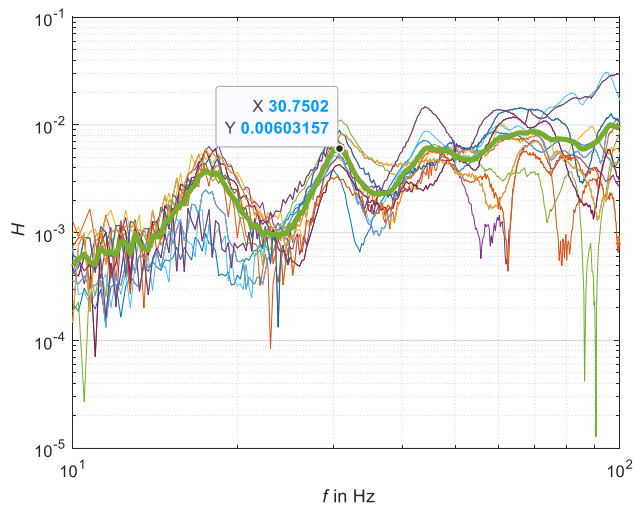


Abbildung 62:
Übertragungsfunktion bei
Anregung mit
Impulshammer, Mittelung
über die Messpunkte in
dicker Linie eingezeichnet

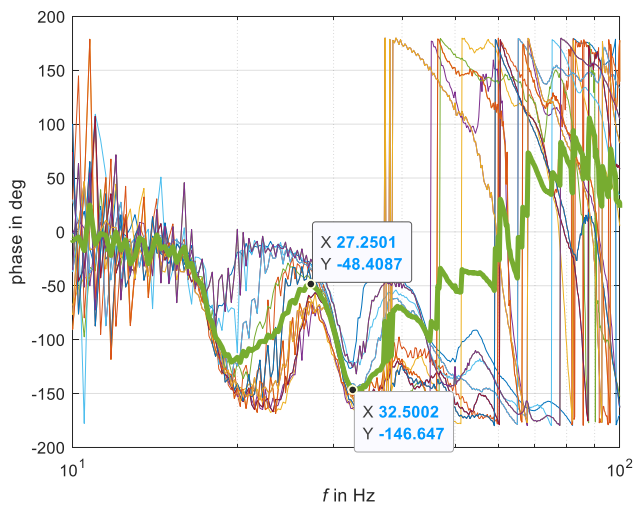


Abbildung 63: Phasengang
bei Anregung mit
Impulshammer, Mittelung
über die Messpunkte in
dicker Linie eingezeichnet

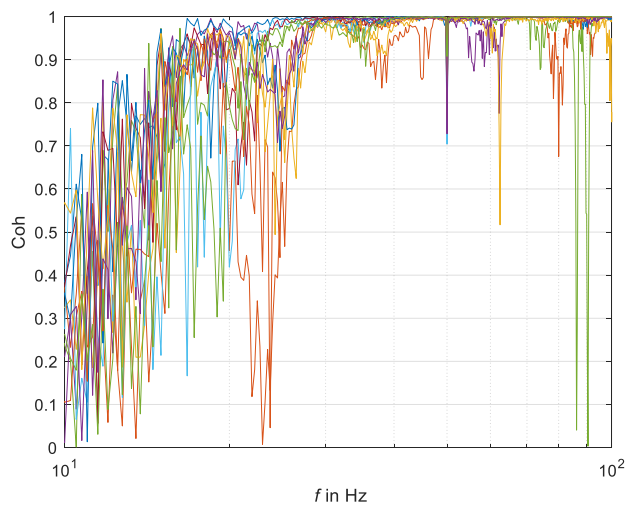


Abbildung 64: Kohärenz bei
Anregung mit
Impulshammer

Die Betrachtung des Phasenganges zeigt einen Phasensprung zwischen 27,3 Hz und 32,5 Hz. In der Übertragungsfunktion ist damit gut übereinstimmend ein Maximum bei 30,8 Hz sichtbar.

Diese Frequenz kann wahrscheinlich mit der für die abgehängte Decke prognostizierten Resonanzfrequenz verglichen werden.

In den nachfolgenden 3 Diagrammen sind die Übertragungsfunktion, der Phasengang und die Kohärenz bei Anregung mit dem **Gummiball** in Abhängigkeit von der Frequenz graphisch dargestellt:

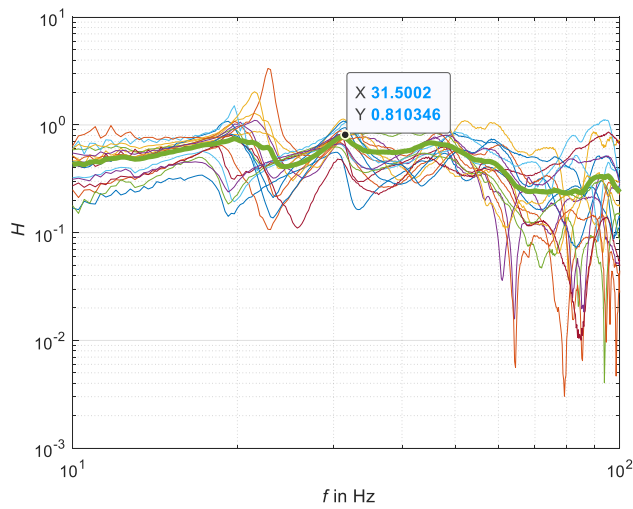


Abbildung 65: Übertragungsfunktion bei Anregung mit Gummiball, Mittelung über die Messpunkte in dicker Linie eingezeichnet.

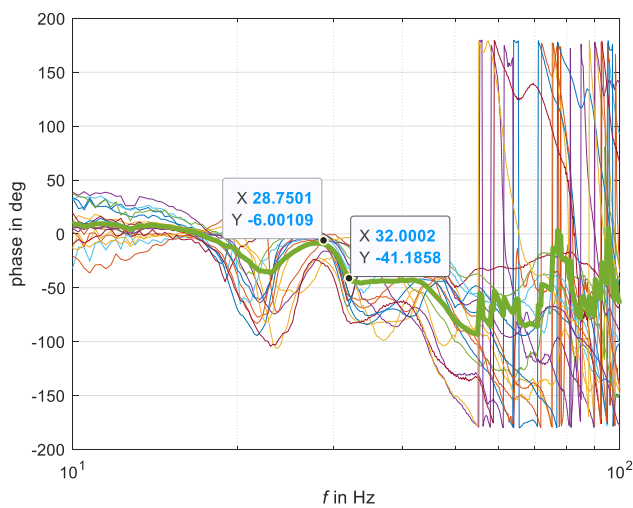


Abbildung 66: Phasengang bei Anregung mit Gummiball, Mittelung über die Messpunkte in dicker Linie eingezeichnet

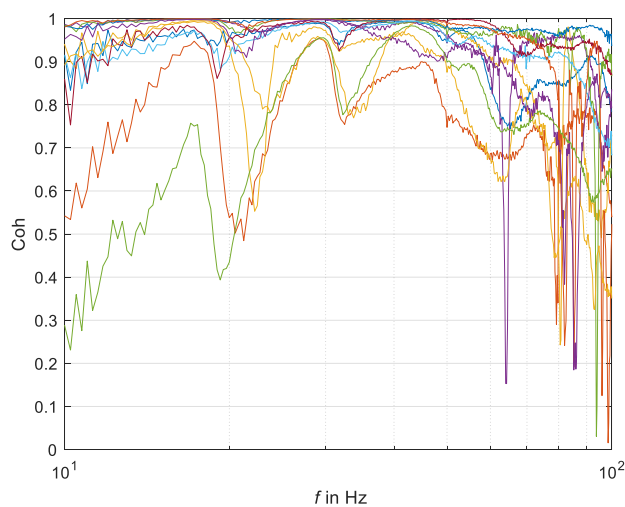


Abbildung 67: Kohärenz bei Anregung mit Gummiball

Die Betrachtung des Phasenganges zeigt einen Phasensprung zwischen 28,8 Hz und 32,0 Hz. In der Übertragungsfunktion ist damit gut übereinstimmend ein Maximum bei 31,5 Hz sichtbar.

Diese Resonanz wurde auch bei der vorhergehenden Messung mit dem Impulshammer erkannt.

Zur Übersicht ist ein Vergleich des Phasenganges zwischen zwei Beschleunigungsaufnehmern bei Anregung mit Gummiball gegenüber Kraft-Signal des Impulshammers zu Beschleunigungsaufnehmer in der nachfolgenden Graphik dargestellt:

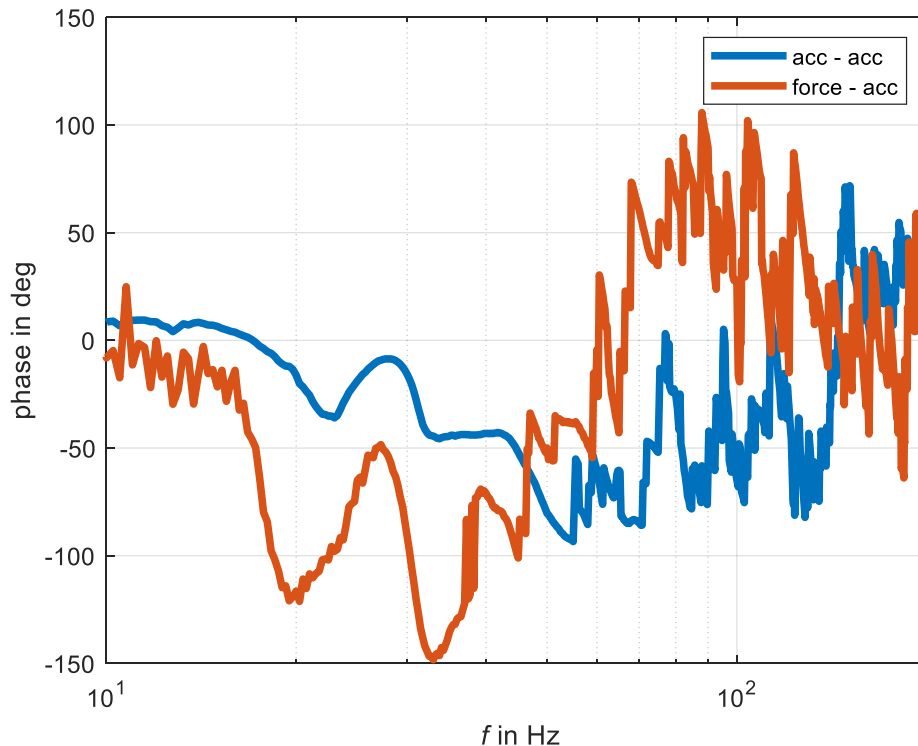


Abbildung 68: Phasengang Beschleunigung – Beschleunigung (blau) und Kraft – Beschleunigung (rot)

Aus den Aufzeichnungen der Versuche mit Anregung durch den Gummiball wurde auch der Frequenzbereich 100 Hz bis 200 Hz ausgewertet, wie nachfolgend dargestellt:

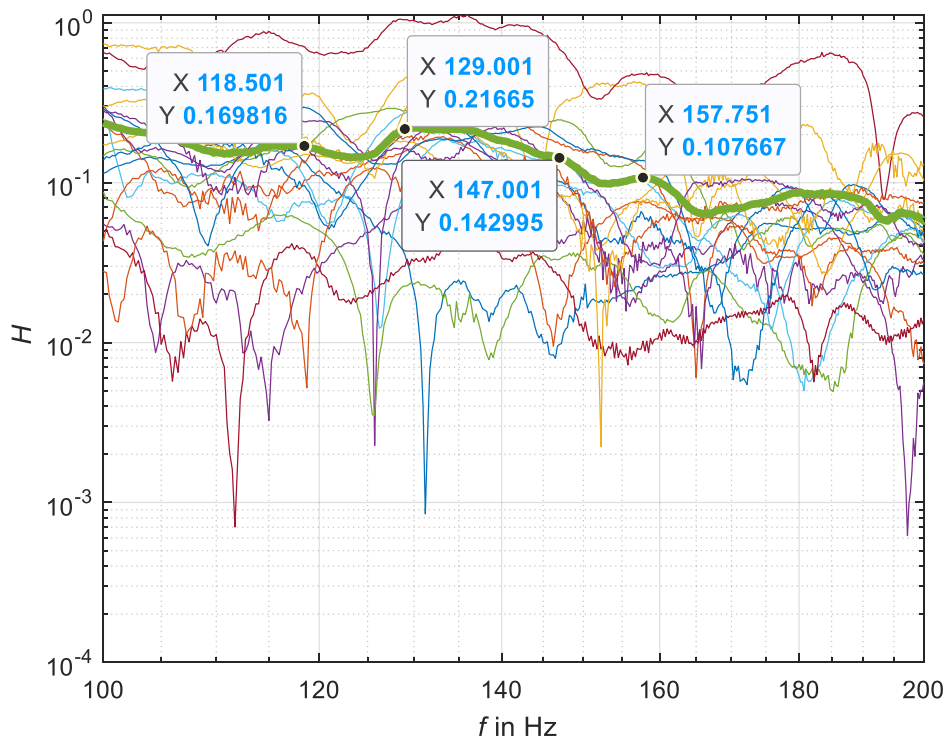


Abbildung 69: Übertragungsfunktion bei Anregung mit Gummiball, Mittelung über die Messpunkte in dicker Linie eingezeichnet

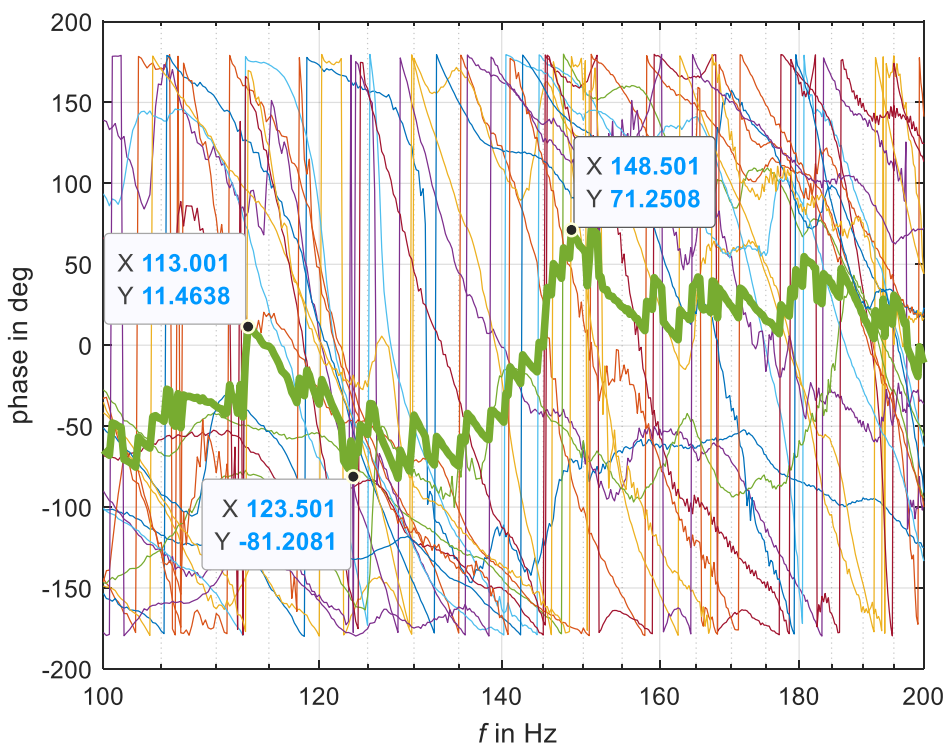


Abbildung 70: Phasengang bei Anregung mit Gummiball, Mittelung über die Messpunkte in dicker Linie eingezeichnet

Erkenntnisse:

An Decken mit höherem Trittschallpegel können auch mit einem leichten Impulshammer plausible Messergebnisse ermittelt werden. Dennoch kann anhand der Diagramme gesagt werden, dass mit größerer Anregungskraft eine erhöhte Sicherheit bei der Interpretation der Graphen zu erwarten ist. Es sollte daher ein Impulshammer mit möglichst großer Masse verwendet werden, da dessen ungeachtet der Verlauf Beschleunigung zu Kraft leichter zu interpretieren ist. Falls die Decke eine so hochwertige Trittschalldämmung aufweist, dass mit dem Impulshammer keine ausreichende Anregungskraft aufgebracht werden kann, soll die Messung mit dem schweren Gummiball durchgeführt werden.

Der Phasengang zwischen dem Signal des im Impulshammer integrierten Kraftaufnehmers und dem Signal des Beschleunigungsaufnehmers liegt im Bereich der rechnerischen Erwartungen.

Die Beschleunigungsaufnehmer müssen ausreichend empfindlich sein, dürfen aber nicht übersteuert werden.

Im Vergleich mit den rechnerischen Prognosen der Resonanzfrequenzen der unterschiedlichen Komponenten des Deckenaufbaus kann abgeschätzt werden, dass die aus den Messungen hergeleitete Resonanzfrequenz um rund 31 Hz durch die Masse-Feder-Masse-Resonanz der abgehängten Decke bestimmt wird. Die erkennbare Spitze um 118 Hz kann durch die Masse-Feder-Masse-Resonanz des Fußbodenaufbaus bestimmt sein, obwohl ihre Form auf eine hohe Dämpfung im System hinweist.

Ein weiterer Phasensprung ist im Bereich von 140 Hz bis 150 Hz sichtbar, wobei eine Spitze bei 147 Hz schwach erkennbar ist. Diese kann möglicherweise durch die Stehwellenresonanz des Luftspalts der abgehängten Decke bedingt sein.

3.2.7 Gebäude InSitu 7

Abbildung 37 zeigt die ermittelten Standard-Trittschallpegel der Holzmassivdeckenkonstruktion in Gebäude 7. Der bewertete Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ beträgt 43 dB mit einem $C_{1,50}$ von 14 dB. Aus $L'_{nT,w} + C_{1,50} = 57$ dB folgt nach ÖNORM B 8115-5:2021 eine Zuordnung zu Schallschutzklasse C, was dem „Basisschallschutz“ entspricht. Wie Abbildung 37 zeigt, ist im Terzbandverlauf des Norm-Trittschallpegels L'_{nT} [dB] bei 63 Hz ein markanter Peak mit anschließendem steilem Abfall zu höheren Frequenzen zu erkennen.

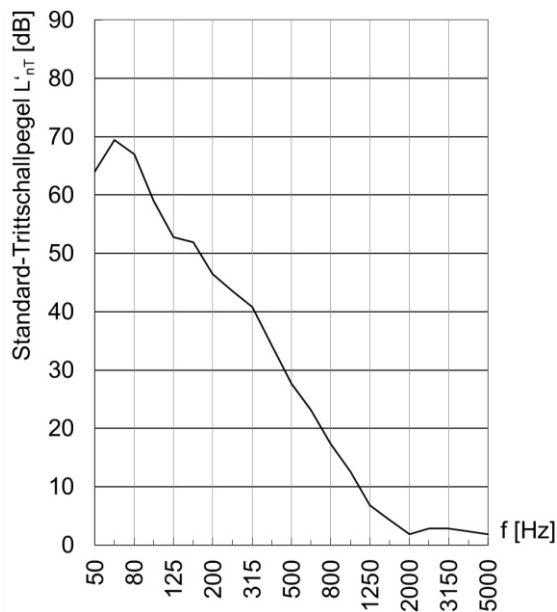


Abbildung 71: Standard-Trittschallpegel der Decke in Gebäude 7

Abbildung 72 zeigt je Anregungsposition die Messwerte der plattenmittig auf der Deckenober- und Unterseite positionierten Beschleunigungssensoren der Resonanzfrequenzmessung mittels der Scherenmethode. Für die Messwerte der „Anregungsposition 2: Quadrant“ wurde wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben vorgegangen. Zunächst wurde der Frequenzbereich gesucht, bei dem der deckenunterseitig gemessene Beschleunigungspegel gegenüber dem deckenoberseitigen tendenziell stark absackt. Infolge wurde ein „Scherenblatt“ für die mittleren Beschleunigungspegel an der Deckenoberseite und ein „Scherenblatt“ für die mittleren Beschleunigungspegel an der Deckenunterseite eingezeichnet. Für „Anregungsposition 2: Quadrant“ resultiert aus dieser Vorgehensweise ein „Scherengelenk“ bei rd. 70 Hz. Im Frequenzbereich kleiner gleich 70 Hz wurden dann die beiden nächstgelegenen markanten Peaks der deckenober- und unterseitigen Beschleunigungspegel gesucht. Da es sich in diesem Beispiel jeweils um einen „zweigeteilten Peak“ handelt, wurde in Bezug auf eine Schallschutzklasseneinteilung auf der sicheren Seite jeweils der höherfrequente „Teilpeak“ ausgewählt, der für den deckenoberseitigen Sensor bei 63 Hz und für den deckenunterseitigen Sensor bei 57 Hz liegt. Die Resonanzfrequenz wurde dann aus dem Mittelwert dieser beiden Peaks mit ca. 60 Hz abgeschätzt.

Auch für eine Auswertung nach der Scherenmethode für „Anregungsposition 1: Ecke“ beträgt das Ergebnis für die Resonanzfrequenz ca. 60 Hz. Die „Anregungsposition 3: Mitte“ zeigte keine bzw. nur schlechte Auswertemöglichkeiten, da man sich dabei mit der Anregung im Nahfeld des deckenoberseitigen Sensors befindet.

Die mittels der Scherenmethode ermittelte Resonanzfrequenz mit 60 Hz zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem nach Abbildung 71 im Norm-Trittschallpegelverlauf erkennbaren Peak beim Terzband 63 Hz. Aus $L'_{nT,w} = 43$ dB und $f_0 = 60$ Hz folgt nach ÖNORM B 8115-5

eine Zuordnung zu Schallschutzklasse C, was dem „Basisschallschutz“ und der Zuordnung auf Basis des Spektrum-Anpassungswert-Kriteriums entspricht.

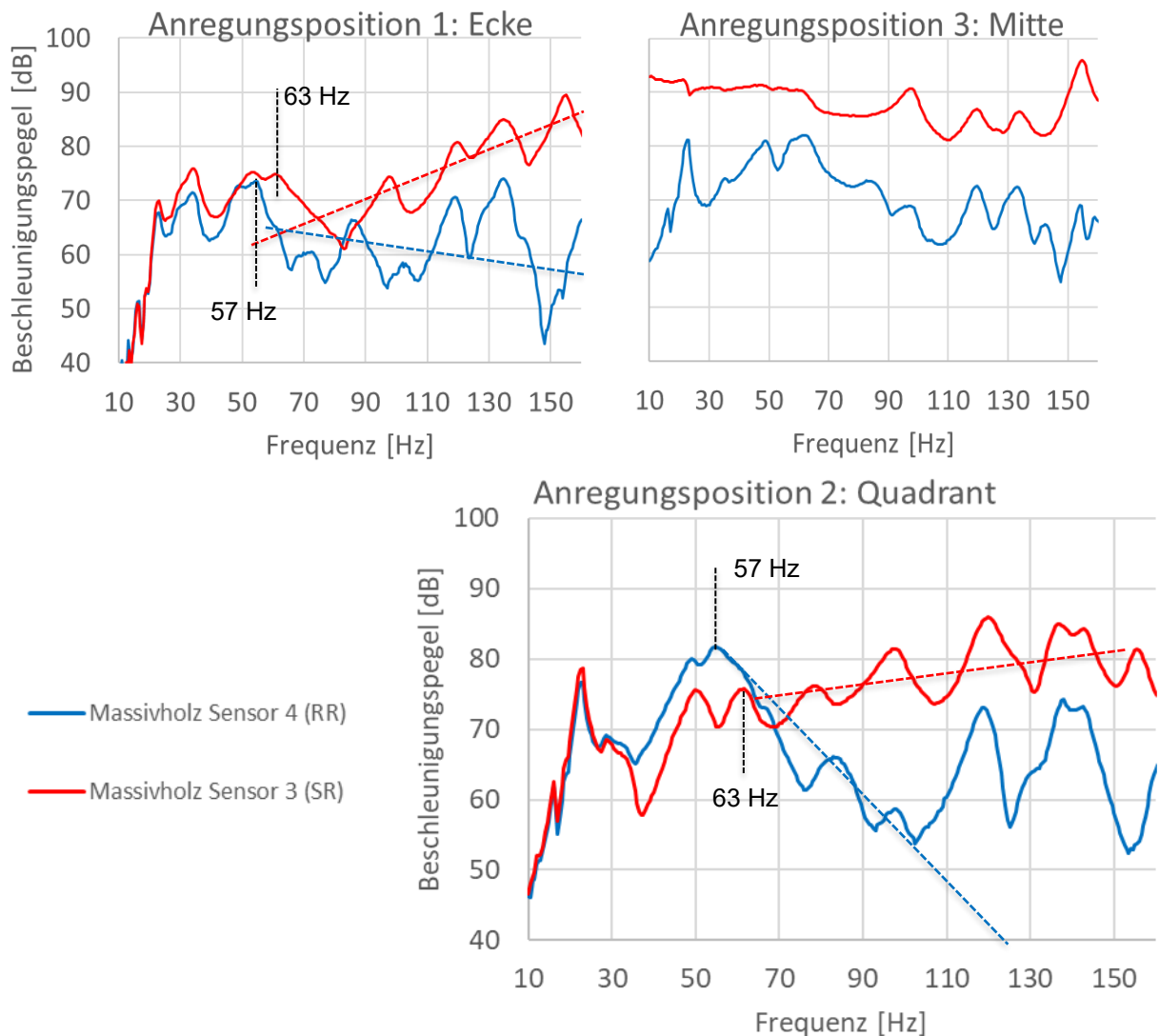


Abbildung 72: Messwerte zur Auswertung der Resonanzfrequenzmessung in Gebäude 7

3.2.8 Gebäude InSitu 8

Abbildung 73 zeigt die ermittelten Standard-Trittschallpegel der Stahlbetondeckenkonstruktion in Gebäude 8. Der bewertete Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ beträgt 31 dB mit einem $C_{l,50}$ von 5 dB. Aus $L'_{nT,w} + C_{l,50} = 36$ dB folgt nach ÖNORM B 8115-5:2021 eine Zuordnung zu Schallschutzklasse A, was einem „hohen Schallschutz“ entspricht. Wie Abbildung 73 zeigt, ist im Terzbandverlauf des Norm-Trittschallpegels L'_{nT} [dB] bei 63 Hz ein markanter Peak mit anschließendem steilem Abfall zu höheren Frequenzen zu erkennen.

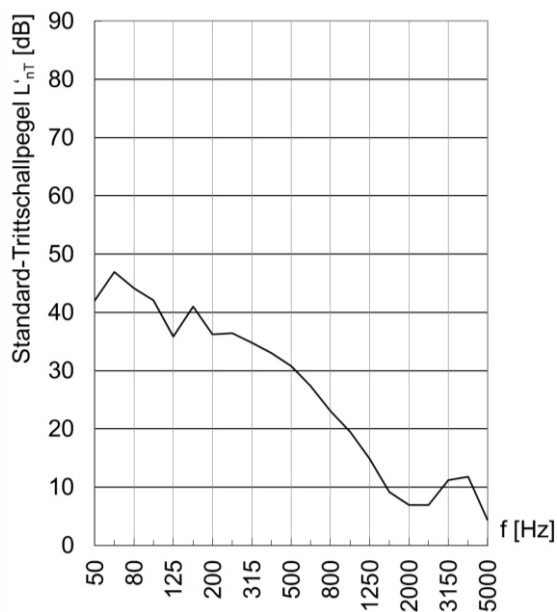


Abbildung 73: Standard-Trittschallpegel der Decke in Gebäude 8

Abbildung 74 zeigt je Anregungsposition die Messwerte der plattenmittig auf der Deckenober- und Unterseite positionierten Beschleunigungssensoren der Resonanzfrequenzmessung mittels der Scherenmethode. Für die Messwerte der „Anregungsposition 2: Quadrant“ wurde wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben vorgegangen, jedoch wurde zuvor testweise der deckenunterseitig gemessene Beschleunigungspegel zum tieffrequenten Niveau des deckenoberseitigen parallelverschoben. Diese Vorgehensweise wurde für dieses Messbeispiel nötig, da die Stahlbetondeckenkonstruktion eine über die Querschnittshöhe höhere Dämpfung aufweist als die betrachteten Holzmassivdeckenkonstruktionen. So verhalten sich im Frequenzbereich unterhalb der Resonanzfrequenz die deckenunterseitig gemessenen Beschleunigungspegel qualitativ gleich wie die deckenoberseitigen, jedoch ist der Absolutpegel auf einem ganz anderen Niveau. Durch das Parallelverschieben des deckenunterseitigen Beschleunigungspegels auf das Niveau des deckenoberseitigen kann eine eindeutige Bestimmung der Schere erfolgen.

Auf diese Weise konnte der Frequenzbereich gesucht werden, bei dem der deckenunterseitig gemessene Beschleunigungspegel gegenüber dem deckenoberseitigen tendenziell stark absackt. Infolge wurde ein „Scherenblatt“ für die mittleren Beschleunigungspegel an der Deckenoberseite und ein „Scherenblatt“ für die mittleren Beschleunigungspegel an der Deckenunterseite eingezeichnet. Für „Anregungsposition 2: Quadrant“ resultiert aus dieser Vorgehensweise ein „Scherengelenk“ bei rd. 33 Hz. Im Frequenzbereich kleiner gleich 33 Hz wurden dann die beiden nächstgelegenen markanten Peaks der deckenober- und unterseitigen Beschleunigungspegel gesucht, die für den deckenober- und unterseitigen Sensor für diese Frequenzauflösung auch bei ca. 33 Hz liegen. Daraus folgte auch die Lage der Resonanzfrequenz bei ca. 33 Hz.

Auch für eine Auswertung nach der Scherenmethode für „Anregungsposition 1: Ecke“ beträgt das Ergebnis für die Resonanzfrequenz ca. 33 Hz, jedoch ist die Interpretation für diese Anregungspunkt- mit Messpunktkombination wesentlich schwieriger. Die „Anregungsposition 3: Mitte“ zeigte keine bzw. nur schlechte Auswertemöglichkeiten, da man sich dabei mit der Anregung im Nahfeld des deckenoberseitigen Sensors befindet.

Die mithilfe der Scherenmethode ermittelte Resonanzfrequenz bei 33 Hz zeigt keine gute Übereinstimmung mit dem nach Abbildung 73 im Standard-Trittschallpegelverlauf erkennbaren Peak beim Terzband 63 Hz. In der Folge wäre zu untersuchen, ob für den Standard-Trittschallpegelverlauf unter 50 Hz bereits ein steiler Abfall festzustellen ist und welche Ursache der markante Peak bei 63 Hz haben könnte. Aus $L'_{nT,w} = 31$ dB und $f_0 = 33$ Hz folgt nach ÖNORM B 8115-5 eine Zuordnung zu Schallschutzklasse B, was einem „erhöhten Schallschutz“ entspricht. Aus dem Wert 33 Hz aus der Schmalbandbetrachtung lässt sich jedoch ein Terzbandwert von 31 Hz ableiten, der einer Schallschutzklasse A entspricht. Im Moment ist der ÖNORM B 8115-5 noch kein Hinweis zu entnehmen, in welcher Frequenzauflösung die Resonanzfrequenzen bei der Zuordnung zu den Schallschutzklassen zu berücksichtigen sind.

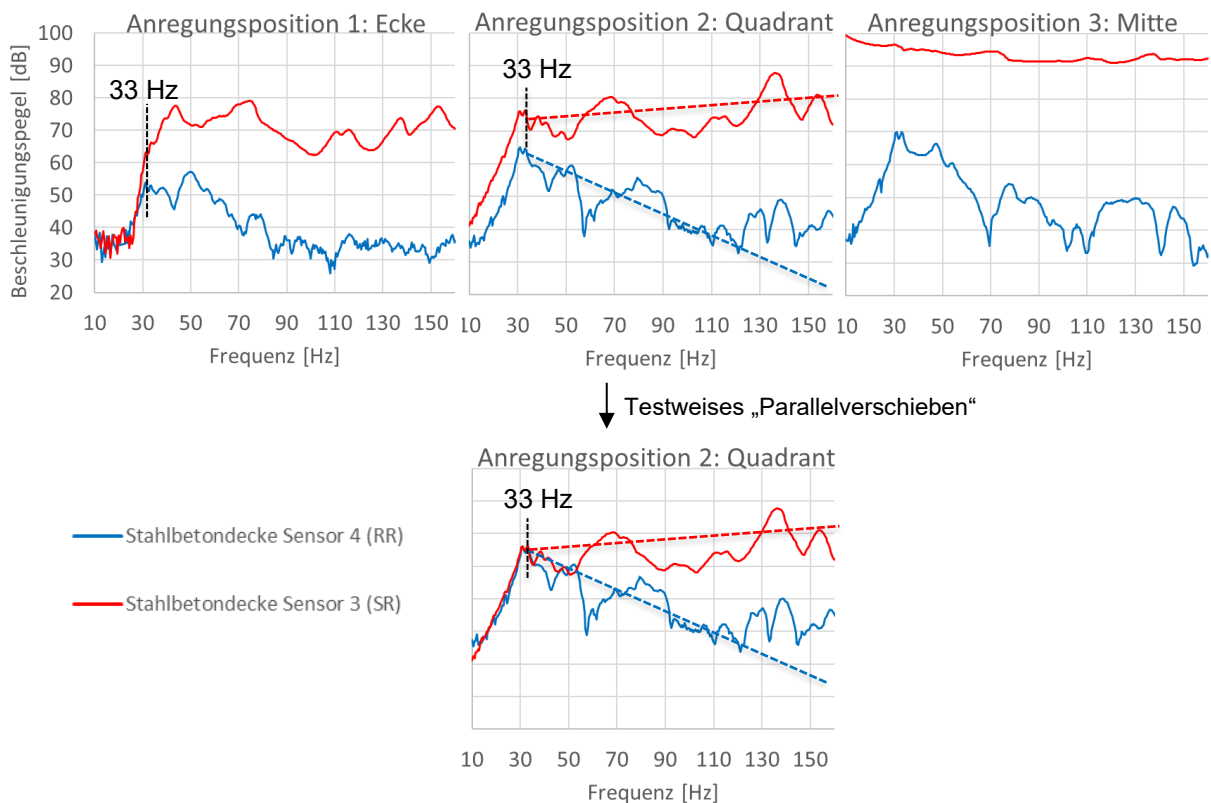


Abbildung 74: Messwerte zur Auswertung der Resonanzfrequenzmessung in Gebäude 8

3.2.9 Zusammenfassung

Im Zuge der durchgeführten in situ Messungen konnte die Messsystematik der Phasendifferenzmethode soweit verbessert werden, dass die resultierenden Messdaten – entgegen den zu Projektbeginn im Prüfstand durchgeführten Messungen - durch eine Software analysiert werden können. Des Weiteren wurde ersichtlich, dass die Maximalpegelmessung mit dem japanischen Gummiball eine geeignete Methode darstellt, um abzuschätzen in welchen Frequenzbereich die Resonanzfrequenz bei der Auswertung der Phaseninformation liegen kann. Damit bekommt man weitere, zur Auswertung hilfreiche Informationen. Sofern die Möglichkeit besteht, sollte der gleiche Deckenaufbau bei zwei oder mehr unterschiedlichen Raumgrößen gemessen werden, um auftretende Eigenmoden identifizieren zu können. Auch dieses Vorgehen erleichtert die Auswertung der Messdaten deutlich.

Je nach Deckenaufbau waren die in situ Messwerte der Phasendifferenzmessung mehr oder weniger gut zu interpretieren. Bei den untersuchten Decken im Prüfstand war in viele Fällen ein einfacher zweischaliger Aufbau (zum Beispiel: Zementestrich mit Trittschalldämmung und schwerer Schüttung auf Brettsperholz bzw. Betondecke) gut auswertbar. Wird eine andere Schüttung verwendet, wie zum Beispiel EPS Granulat, verändert sich die Situation deutlich. Trockenestriche verändern das Verhalten ebenso und machen ein Ablesen der Resonanzfrequenz schwieriger. Zum Einfluss von Unterdecken kann noch keine finale Aussage getroffen werden, da zu wenig Messdaten vorliegen. Hierfür sind weiterführenden Messungen durchzuführen.

Bei Messung der Phasendifferenz hat sich auch gezeigt, dass die Anregungskraft für die Messungen ausreichend groß sein muss, was besonders bei schalltechnisch hochwertigen Decken mit dem Impulshammer nicht immer realisiert werden kann. Es sollten zudem Informationen über den Aufbau der Decke vorliegen, um vorab rechnerisch einen Frequenzbereich für die messtechnische Ermittlung der Resonanzfrequenz festlegen zu können. Außerdem erschwert das Vorhandensein einer abgehängten Decke die Ermittlung der Resonanzfrequenz des Fußbodenaufbaus deutlich.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen wird ersichtlich, dass die Schalldämmung von dreischaligen Decken im Wesentlichen durch die „untere“ Resonanzfrequenz bestimmt wird. Der Einbruch in der Schalldämmung durch die „obere“ Resonanzfrequenz ist häufig nicht maßgeblich und wird durch das bereits wirkende, zweischalige Schwingungssystem entschärft. Bei Dreimassenschwingern wird deshalb die untere Resonanzfrequenz als maßgeblich angesehen und primär ausgewertet.

3.3 Abgleich des in situ gemessenen und prognostizierten Trittschallschutzes und der kritischen Resonanzfrequenz

In Tabelle 37 werden die Ergebnisse aus den in situ Messungen mit der Phasendifferenzmethode zusammengefasst. Es werden folgende Resonanzfrequenzen angegeben:

- Erste (untere) berechnete Resonanzfrequenz $f_{01,Ber}$
- Zweite (obere) berechnete Resonanzfrequenz $f_{02,Ber}$ (wenn dreischalige Aufbauten vorliegen)
- Resonanzfrequenz aus Ballmessung $f_{0,Ball}$
- Resonanzfrequenz gemessen mit Phasendifferenzmethode (Methode 2 gem. Tabelle 16 bzw. Abschnitt 2.1.1.3) bestimmt durch Bearbeiter $f_{0,Phase}$
- Resonanzfrequenz gemessen mit Phasendifferenzmethode (Methode 2 gem. Tabelle 16 bzw. Abschnitt 2.1.1.3) bestimmt mit Auswertesoftware $f_{0,Phase,TUW}$

Die einzelnen Frequenzen sollen mit einander verglichen werden. Vergleicht man zuerst die mit der Software bestimmte ($f_{0,Phase,TUW}$) und die der Bearbeiter:in ($f_{0,Phase}$) bestimmte Resonanzfrequenz kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Die einzige Abweichung tritt bei In-Situ 5, M9 auf. Dies kann auf einen Doppelpeak, den die Software nicht genau identifizieren konnte, zurückgeführt werden. Damit kann die Software, bei stimmiger Datenqualität, zur Bestimmung der Resonanzfrequenz eingesetzt werden. Es sollte aber eine Plausibilitätskontrolle durch die Bearbeiter:in durchgeführt werden.

In Tabelle 37 wird zusätzlich ersichtlich, ob die gemessene unter der berechneten Resonanzfrequenz liegt. Dies ist die günstigere Situation für Planer wenn die tatsächliche Resonanz nahe bei der berechnete Resonanzfrequenz aber trotzdem etwas darunter liegt. In den hier untersuchten Decken wurde eine maximale Abweichung von 13 Hz zwischen Berechnung und Messungen erreicht. In diesem Fall war der Unterschied günstig, da die Berechnung über der Messung liegt. Bei einem Großteil den Decken lag die berechnete Resonanzfrequenz über der gemessenen. Im Allgemeinen ist die Berechnung der Resonanzfrequenz ein gutes Mittel, um die Resonanzfrequenz abschätzen zu können. Wobei die Berechnung bei Deckensystemen mit Unterdecken exakter gestaltet werden sollte, da momentan hauptsächlich nur mit einer „Luftfeder“ bei Abhängungen gerechnet wird. In der Realität ist es aber eine Kombination aus Luftfeder und der Federsteifigkeit des Abhängesystems (Schödel 2018; Rabold et al. 2019; Mecking et al. 2022). Um diese Situation zu verbessern, müssen die Steifigkeiten von Abhängesystemen bestimmt und in die Berechnung eingebunden werden (siehe Kapitel 3.1.3 auf Seite 66). Die berechneten Resonanzfrequenzen der Dreimassenschwinger liegen dadurch i.d.R. etwas höher als in Tabelle 37 aufgeführt. Des Weiteren spielt für die Resonanz die innere Dämpfung des Deckensystems eine Rolle. Diese wird aktuell jedoch ebenfalls nicht mitberücksichtigt.

Tabelle 37: Übersicht der Ergebnisse aus den in situ Messungen mit der Phasendifferenzmethode

Deckenaufbau	Resonanzfrequenz in Hz					
	$f_{01,Ber}$	$f_{02,Ber}$	$f_{0,Ball}$	$f_{0,Phase}$ (Methode 2)	$f_{0,Phase,TUW}$ (Methode 2)	$f_{0,Phase} < f_{01,Ber}$
In-Situ 1, M1: kleiner Raum	29	66	63	28	27,3	Ja
In-Situ 1 M2: großer Raum	29	66	50	31	31,3	Nein
In-Situ 2 M3: großer Raum	58	--	50	46	46,1	Ja
In-Situ 2 M4: kleiner Raum	58	--	50	48	48,4	Ja
In-Situ 3 M5: kleiner Raum	62	86	50	42	42,2	Ja
In-Situ 4 M6: kleiner Raum	48	--	40	35	35,2	Ja
In-Situ 5 M8: kleiner Raum	25	66	40	31	30,5	Nein
In-Situ 5 M9: großer Raum	25	66	50	36	21,9	Nein
In-Situ 6 M10: kleiner Raum	35	235	63	71	70,3	Nein

Tabelle 38 zeigt die Ergebnisse aus den In-Situ-Messungen mit der Scherenmethode. Beim Deckenaufbau In-Situ 7 (Massivholzdecke) liegt der berechnete Wert leicht unterhalb und beim Deckenaufbau In-Situ 8 (Stahlbetondecken) über den Messwerten.

Tabelle 38: Übersicht der Ergebnisse aus den in situ Messungen mit der Scherenmethode

Deckenaufbau	Resonanzfrequenz in Hz		
	$f_{01,Ber}$	$f_{0,Schere}$	$f_{0,Schere} < f_{01,Ber}$
In-Situ 7	56	60	Nein
In-Situ 8	48	33	Ja

Tabelle 39 zeigt eine Gegenüberstellung der im Labor mit den Messmethoden Phasendifferenzmethode (Methode 1 gem. Tabelle 16), Amplitudenmessung (Vavrik-Kirchsteiger und Ferk 2024b) und Scherenmethode (Abschnitt 2.1.3) gemessenen Resonanzfrequenzen mit den berechneten Resonanzfrequenzen. Die Messergebnisse der Messmethoden stimmen in 2 von 3 Fällen mit einer Abweichung ≤ 21 Hz mit der Berechnung überein. Wie bei den in situ Messungen ist in dem meisten Fällen der Wert der messtechnisch ermittelten Resonanzfrequenz f_0 [Hz] höher als der der prognostizierten Resonanzfrequenz. Ein möglicher Grund könnte sein, dass die Hersteller die dynamische Steifigkeit im Allgemeinen auf der sicheren Seite liegend eher etwas steifer angeben. Zudem weist das normative Messverfahren zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit an Kleinproben ganz andere Randbedingungen auf als die Mess- und Einbausituation von ganzen Deckenkonstruktionen (siehe auch (Bietz und Wittstock 2018)).

Tabelle 39: Gegenüberstellung der mit den entwickelten Methoden gemessenen und der berechneten minimalen Resonanzfrequenzen

Deckenaufbau	Prognostizierte Resonanzfrequenz f_0 in Hz	Gemessene Resonanzfrequenz f_0 in Hz
VK-ACA 4	68 Hz	HFA: 57 Hz (Phasendifferenzmethode) TU Graz: ca. 68 Hz (Amplitudenmessung) ca. 70 Hz (Scherenmethode)
VK-TUG 1	55 Hz	ca. 34 Hz (Amplitudenmessung) ca. 36 Hz (Scherenmethode)
VK-TUG 2	65 Hz	ca. 37 Hz (Amplitudenmessung) ca. 39 Hz (Scherenmethode)

In Tabelle 40 sind die nach dem differenzierten Verfahren in (Blödt 2020) bzw. (Rabold et al. 2020) prognostizierten bewerteten Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ und die dazugehörigen bewerteten Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ mit und ohne Sicherheitsbeiwert für die Prognose u_{prog} von 3 dB den Messwerten (rechte Spalte) gegenübergestellt. Die prognostizierten bewerteten Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ wurden auf Basis des jeweiligen Raumvolumens und unter der Annahme von einer Nachhallzeit von 0,5 s ermittelt. Insgesamt konnten von den 11 durchgeführten in situ Messungen 8 mit dem genannten Verfahren prognostiziert werden. In 6 von 8 Fällen liegt die Prognose inkl. Sicherheitsbeiwert von 3 dB auf der sicheren Seite, ohne Sicherheitsbeiwert in 4 von 8 Fällen. In „Anhang 4: Prognose Trittschalldämmung in situ“ sind die Details bzw. die verwendeten Kennwerte für die jeweils durchgeführte Prognose aufgeführt.

Tabelle 40: Gegenüberstellung der gemessenen und der nach dem Verfahren in (Blödt 2020) bzw. (Rabold et al. 2020) berechneten Trittschalldämmung in den Gebäuden. Grün = Prognose korrekt/auf der sicheren Seite; rot = Prognose auf der unsicheren Seite

Deckenaufbau	Prognostizierter bewerteter Norm-/Standard-Trittschallpegel in dB		Bewerteter Norm-/Standard-Trittschallpegel in situ in dB
	$L'_{n,w} \mid L'_{nT,w}$		
	<i>exkl. u_{prog}</i>	<i>inkl. $u_{prog} = 3 \text{ dB}$</i>	$L'_{n,w} \mid L'_{nT,w}$
In-Situ 1 M1: kleiner Raum	43 43	46 46	45 45
In-Situ 1 M2: großer Raum	-- ¹	--	52 46
In-Situ 2 M3: großer Raum	-- ¹	--	48 42
In-Situ 2 M4: kleiner Raum	48 48 ²	51 51	45 45
In-Situ 3 M5: kleiner Raum	40 40 ³	43 43	52 52
In-Situ 4 M6: kleiner Raum	46 45	49 48	48 47
In-Situ 5 M8: kleiner Raum	45 45	48 48	37 37
In-Situ 5 M9: großer Raum	44 41	47 44	44 41
In-Situ 6 M10: kleiner Raum	57 57 ²	60 60	61 61
In situ 7	49 48	52 51	43 43
In situ 8	-- ⁴	--	31 31
1, 2, 3, 4 Erklärungen zu Fußnoten siehe Tabelle 41.			

Tabelle 41: Anmerkungen und Diskussion zu den Fußnoten der Prognose in Tabelle 40.

Anmerkungen/Grenzen der Prognose:

¹ Aufgrund der nicht bekannten Abgrenzung der Deckenflächen sowie der verwinkelten Raumgeometrien war in diesen Fällen eine Prognose nach dem vereinfachten Verfahren nicht möglich.

² Bei der Prognose dieser Situationen fällt auf, dass hier der Norm-Trittschallpegel der Decke selbst dominant ist und der prognostizierte Flankenanteil nur zu einer Erhöhung um max. 1 dB führt. Die Prognoseungenauigkeit ist hierbei also vor allem auf das Einschätzen der Deckenaufbauten selbst zurückzuführen.

³ Der große Unterschied zwischen Prognose und Messung könnte hier auf unterschiedliche Grundrisse von Sende- und Empfangsraum sowie Unklarheiten bzgl. der tragenden flankierenden Bauteile zurückzuführen sein. Außerdem kam aus den zur Verfügung gestellten Plänen nicht heraus, ob in der Unterdecke Federschienen oder Holzlattung eingesetzt wurden. Der Einsatz von Holzlattungen könnte den großen Unterschied von über 10 dB erklären.

⁴ In dieser Situation wurde keine Prognose durchgeführt, da es sich um Stahlbeton-Massivbau handelt.

3.4 Erstellen eines Bauteilkatalogs mit rechnerischer Analyse der Resonanzfrequenzen von typischen Trenndecken

In Anhang 3 (Tabelle 43 und Tabelle 44) werden typische Trenndecken in Holzbauweise mit folgenden schalltechnischen Kennwerten aufgeführt:

- Bewerteter Norm-Trittschallpegel mit Spektrum-Anpassungswerten
- Bewertetes Schalldämm-Maß mit Spektrum-Anpassungswerten
- Resonanzfrequenzen

Zur Berechnung der zweischaligen Aufbauten wurde Formel 3 und für die dreischaligen Aufbauten Formel 4 benutzt. Wie sich zeigt, liegen die unteren Resonanzfrequenzen der Deckenaufbauten zwischen 24 Hz und 55 Hz und die oberen Resonanzfrequenzen zwischen 58 Hz und 161 Hz.

3.5 Analyse des Anforderungsdeskriptors „Resonanzfrequenz“

Nachfolgend werden die Ergebnisse der statistischen Analyse zur Eignung des Anforderungsdeskriptors „Resonanzfrequenz“ als Kriterium für die empfundenen Performance einer Holzbaukonstruktion im Trittschallschutz aufgeführt und diskutiert. Die in Abbildung 75 dargestellte Häufigkeitsverteilung zeigt die Differenzen der auf Basis der prognostizierten Resonanzfrequenz f_0 [Hz] zugeordneten Schallschutzklasse minus der auf Basis des

Spektrum-Anpassungswertes $C_{1,50}$ [dB] zugeordneten Schallschutzklasse. Die Zuordnung zu den Schallschutzklassen nach ÖNORM B 8115-5:2021 erfolgte jeweils in Kombination mit dem bewerteten Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ [dB]. Für die statistische Auswertung bzw. Differenzenbildung wurden der in ÖNORM B 8115-5:2021 definierten Schallschutzklasse A (hoher Schallschutz) bis Schallschutzklasse E (geringer Schallschutz) die „Klassen „1“ bis „5“ zugewiesen.

Die Datenbasis bilden die in Abschnitt 2.5 beschriebenen 100 zufällig ausgewählten Messergebnisse von Holzmassivdeckenkonstruktionen. Für diese betrachteten Deckenkonstruktionen liegen die prognostizierten Resonanzfrequenzen im Bereich **36 Hz** bis **98 Hz**. Abweichend zur Forderung in ÖNORM B 8115-5 3.4 wurden für die Zuordnung zu Schallschutzklassen für Konstruktionen, die als Dreimassenschwinger wirken, nicht die maximale (obere), sondern minimale (untere) Resonanzfrequenz hinzugezogen. Außerdem wurde die jeweils rechnerisch prognostizierte Resonanzfrequenz direkt für eine Einteilung in die Schallschutzklassen, d.h. ohne vorherige Zuordnung zu einem Terzband, verwendet.

Wie Abbildung 75 (li) zeigt, liegt für die 100 Messwerte der betrachteten Deckenkonstruktionen die Schallschutzklasse auf Basis der prognostizierten Resonanzfrequenz f_0 in den meisten Fällen **gleich** oder **ein** bis **zwei** Klassen über (das heißt in einer ungünstigeren Einstufung) der Schallschutzklasse auf Basis des Spektrum-Anpassungswertes $C_{1,50}$. Es ist zu beachten, dass bei dieser Klasseneinteilung eine höhere Klasse für einen schlechteren Schallschutz steht. Ausnahme bilden 8 der 100 betrachteten Deckenkonstruktionen, die einen hohen bewerteten Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ (jedoch ≤ 48 dB) in Kombination mit einem hohen Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50}$ (von 11 bis 19 dB) aufweisen und auf Basis des $C_{1,50}$ - Kriteriums in die Schallschutzklasse 4 (D) fallen.

In Abbildung 75 (re) wurden die 100 zufällig ausgewählten Messwerte von Deckenkonstruktionen auf jene 61 Messungen reduziert, bei denen es sich um eine Messung der Direktübertragung zwischen zwei übereinanderliegenden Send- und Empfangsräumen handelt. Wie ein Vergleich mit Abbildung 75 (li) zeigt, stimmt bei Betrachtung der Direktmessungen ohne Diagonalmessungen die Schallschutzklasse auf Basis der rechnerisch prognostizierten Resonanzfrequenz f_0 häufiger mit der Schallschutzklasse auf Basis der Spektrum-Anpassungswerte $C_{1,50}$ überein.

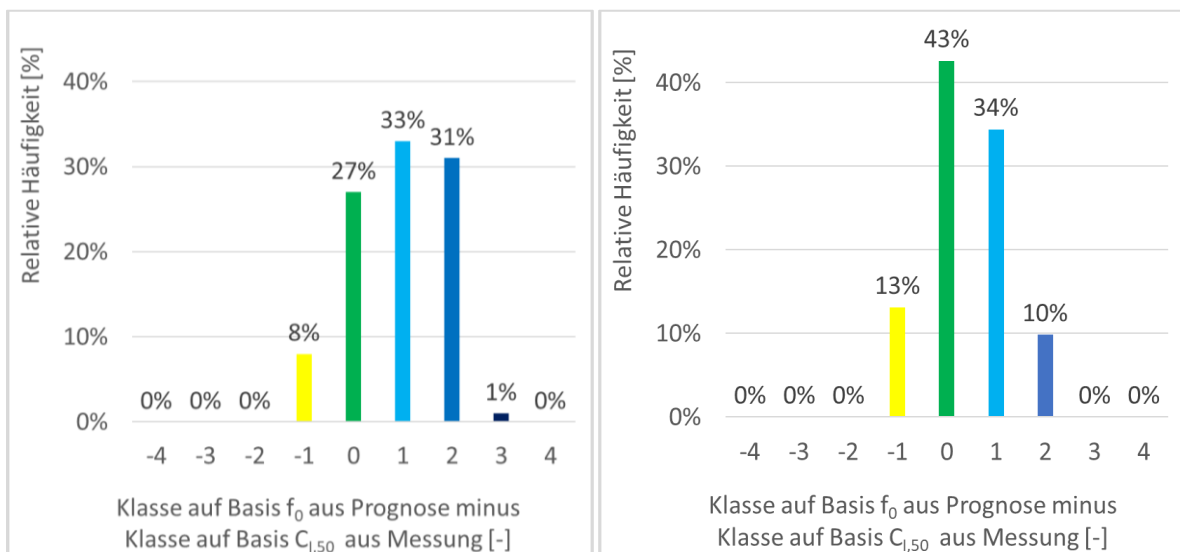


Abbildung 75: Relative Häufigkeit der Differenzen der Schallschutzklassen auf Basis der prognostizierten Resonanzfrequenz f_0 und der Schallschutzklassen der Spektrum-Anpassungswerte $C_{1,50}$ (li) der zufällig ausgewählten Messwerte von 100 Deckenkonstruktionen (re) Direktmessungen von 61 Deckenkonstruktionen

Abbildung 76 (li) zeigt eine Korrelationsuntersuchung zwischen der Resonanzfrequenz f_0 [Hz] aus dem Trittschallpegel-„peak“ der Messwerte und der Resonanzfrequenz f_0 [Hz] aus der rechnerischen Prognose auf Basis des Deckenaufbaus. Die Resonanzfrequenz aus dem Trittschallpegel-„peak“ aus den Messwerten entspricht dem „Peak“ bzw. „steilen Abfall“ im Terzbandverlauf des Standard-Trittschallpegels L'_{nT} [dB].

Es ist zu beachten, dass in manchen Fällen eine eindeutige Identifizierung des „Peak“'s mit darauffolgendem „steilen Abfall“ nicht möglich war. Dies führt zu einer gewissen Unsicherheit bezüglich der Korrelationsbetrachtung und Häufigkeitsverteilung nach Abbildung 76. Mit solchen „Ablese“-Unsicherheiten ist jedoch auch in der Praxis bei dieser Methode zur Ermittlung der Resonanzfrequenz zu rechnen. In derartigen Fällen wurde als Kriterium für diese Auswertungen festgelegt, dass der jeweils höchste „Peak“ von 50 Hz bis 5 kHz ausgewählt wird. Sollte dieser „Peak“ über mehrere Terzen ein Plateau aufweisen, so wurde der hoch-frequenteste Wert verwendet.

In Abbildung 76 (re) ist ein Häufigkeitsdiagramm analog zu Abbildung 75 dargestellt, jedoch wird die Resonanzfrequenz f_0 auf Basis des Trittschallpegel-„peaks“ für die Zuordnung zu Schallschutzklassen verwendet. Trotz der Ableseunsicherheit aus den Terzband-Messdaten, zeigt sich im Vergleich zu Abbildung 75 eine qualitativ gleichwertige Verteilung über die Klassendifferenzen.

Es sei darauf hingewiesen, dass die Identifizierung der Resonanzfrequenz f_0 auf Basis des Trittschallpegel-„peaks“ den Nachteil aufweist, dass die Schallschutzklasse 1 (A) in der Auswertung des Versuchssamples nicht erreicht werden kann. Dies resultiert daraus, dass die gemessenen Terzbandwerte des Trittschallpegels (wie dies in der Praxis häufig der Fall ist) zumeist erst ab 50 Hz vorliegen und das Resonanzfrequenzkriterium nach ÖNORM B 8115-5

für Klasse 1 (A) ≤ 31 Hz ist. Zu berücksichtigen ist aber auch, dass die verwendeten Ergebnisse der Gütemessungen auf Konstruktionen mit einem Zielwert von 48 dB für den bewerteten Standard-Trittschallpegel basieren und nicht auf das Erreichen höherer Schallschutzklassen ausgelegt waren.

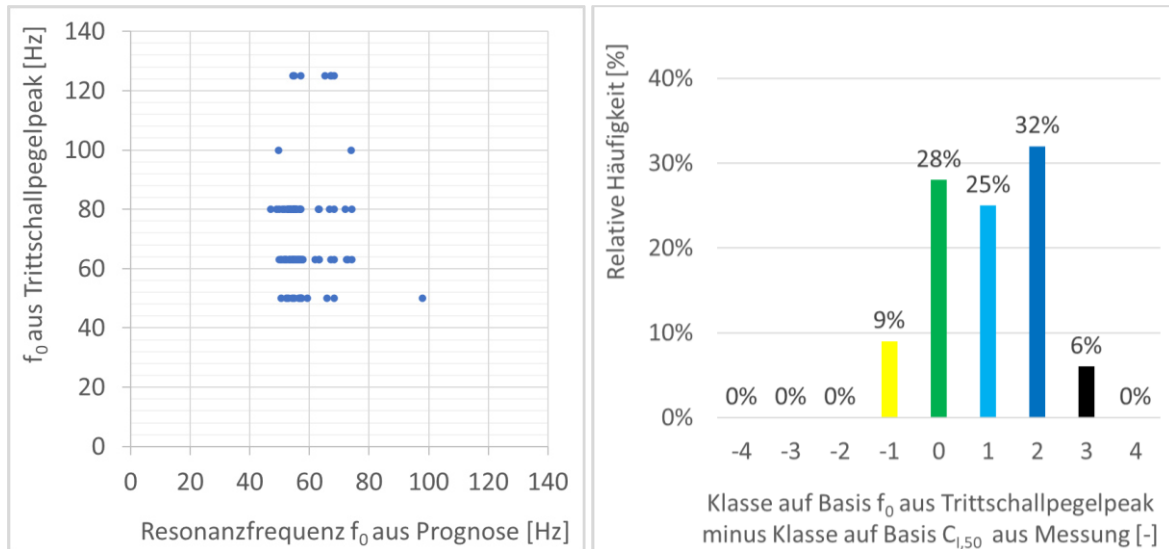


Abbildung 76: (li) Korrelationsuntersuchung der Resonanzfrequenz f_0 aus dem Trittschallpegel-“peak“ mit der Resonanzfrequenz f_0 aus der Prognose (re) Relative Häufigkeit der Differenzen der Schallschutzklassen auf Basis der Resonanzfrequenz f_0 aus dem Trittschallpegel-“peak“ und der Schallschutzklassen der Spektrum-Anpassungswerte $C_{1,50}$

Abbildung 77 (li) zeigt eine Korrelationsuntersuchung zwischen dem Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50}$ [dB] aus der Messung und der Resonanzfrequenz f_0 [Hz] aus der rechnerischen Prognose auf Basis des Deckenaufbaus. Wie zu erkennen ist, zeigt sich für die betrachteten in situ Messwerte von Holzmassivdeckenkonstruktionen, bei denen es sich bei den meisten um 3-Massenschwinger handelt, keine markante Korrelation. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die raumbegrenzenden Wandkonstruktionen bzw. Flanken bei den in situ Messungen einen Einfluss auf die Messergebnisse der Decken ausüben. Auch können die Lagerungsbedingungen und Deckendimensionen entsprechend variieren.

Für eine Gegenüberstellung der Schallschutzklasse auf Basis des Spektrum-Anpassungswertes $C_{1,50}$ [dB] und der Schallschutzklasse auf Basis der Resonanzfrequenz f_0 [Hz] aus der Prognose, wie in Abbildung 77 (re) dargestellt, ist keine markante Verbesserung der Korrelation zu erkennen.

Anm.: Für die Auswertung nach Abbildung 77 wurden nur jene Messungen von Massivholzdeckenkonstruktionen miteinbezogen, bei denen es sich um eine Messung der Direktübertragung zwischen zwei einem übereinanderliegenden Send- und Empfangsraum handelt. Dadurch ist der Stichprobenumfang für diese Betrachtung auf 61 Decken reduziert.

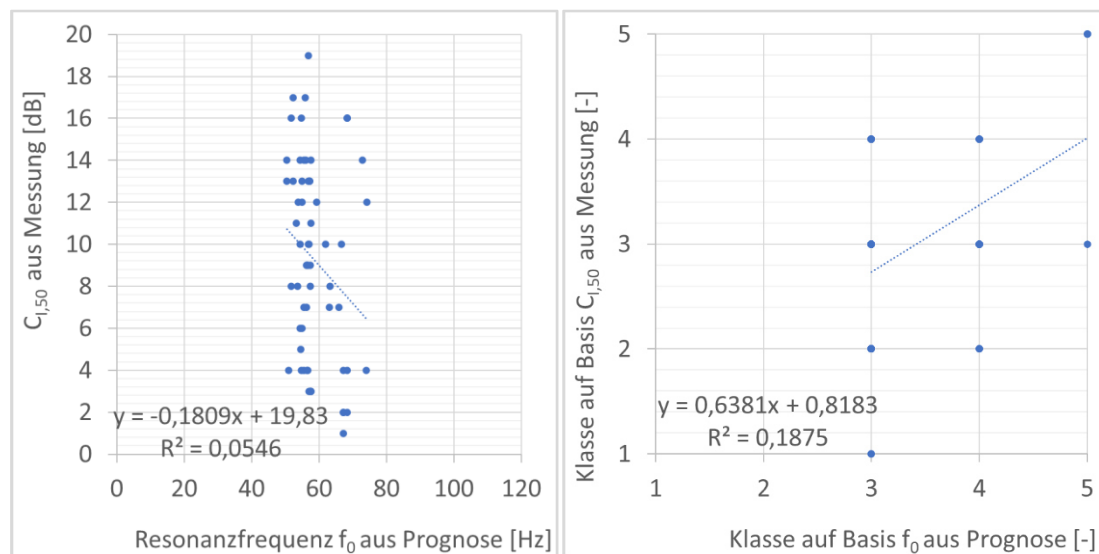


Abbildung 77: Korrelationsuntersuchung des (li) Spektrum-Anpassungswert $C_{1,50}$ [dB] aus der Messung mit der Resonanzfrequenz f_0 aus der Prognose (re) Schallschutzklasse auf Basis des Spektrum-Anpassungswertes $C_{1,50}$ [dB] und der Schallschutzklasse auf Basis der Resonanzfrequenz f_0 [Hz] aus der Prognose

4 Zusammenfassung

Phasendifferenzmethode

Im Projekt konnte die Phasendifferenzmethode von kleinen Versuchsdecken auf große Decken in Prüfständen und in situ übertragen und verbessert werden. Die ersten Optimierungsschritte wurden im Prüfstand vorgenommen und an verschiedenen Deckensystemen getestet. Mit diesem know-how wurden in situ Messungen an unterschiedlichen Deckensystemen durchgeführt und die Messmethodik weiter modifiziert, wodurch eine softwarebasierte Datenauswertung möglich wurde. Bei den in situ Messungen zeigte sich, dass es günstig ist das gleiche Deckensystem bei verschiedenen Raumgrößen zu messen um modale Effekte besser identifizieren zu können. Unterstützend dazu wird empfohlen den Norm- und Maximal-Trittschallpegel bis 25 Hz zu messen. Dies dient dazu weitere Informationen über den Deckenaufbau zu erhalten und somit die Bestimmung der Resonanzfrequenz zu erleichtern. Die Anzahl der Messpunkte entsprechend der erstellten Mess- und Auswertanleitung (siehe Anhang) sollten eingehalten werden, um einen geeigneten Datensatz für die Auswertung zu erhalten. Vor allem wenn es sich um einen inhomogenen Deckenaufbau handelt oder nicht alle Messfelder abgedeckt werden können. Bei der softwarebasierten Auswertung sollte jedenfalls eine Plausibilitätskontrolle durch die Bearbeiter:in durchgeführt werden.

Scherenmethode

Die Praxistauglichkeit der entwickelten Scherenmethode konnte sowohl für Labor als auch in situ Messungen gezeigt werden. Ein Merkmal dieser Methode liegt im relativ einfachen Messaufbau, der auf mind. zwei Beschleunigungssensoren und der Anregung mittels eines Gummihammers basiert, aber auch in den auszuwertenden Messgrößen, die lediglich Beschleunigungspegel darstellen. Außerdem ist es eventuell denkbar, bei Standardisierung der Anregung, z.B. durch eine vorgegebene Fallhöhe bei einer Gummiballanregung, auf eine zeitgleiche Messung der beiden Beschleunigungspegel zu verzichten, wodurch auch Geräte mit nur einem Eingang für die Ermittlung der erforderlichen Messwerte in Frage kommen würden. Dieser Ansatz muss künftig jedoch noch weiter evaluiert werden.

Die Auswertungen mittels der Scherenmethode der betrachteten Labormessungen wurden einer Auswertung nach der Amplitudenmethode gegenübergestellt. Die Ergebnisse aus den Amplitudenmessungen zeigen für die betrachteten Deckenkonstruktionen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Scherenmethode.

Phasendifferenz- und Scherenmethode

Im allgemeinen werden durch die beiden Messmethoden eher Frequenz**bereiche**, in denen die Resonanzfrequenz des Deckenaufbaus liegt ermittelt, nicht ein konkreter, alleingültiger Zahlenwert. Zur Identifikation von Schwankungsintervallen sind jedoch noch weitere Untersuchungen notwendig.

Berechnung der Resonanzfrequenz

Zum Abgleich der Berechnung mit der Messung wurde die (untere) Resonanzfrequenz von 28 Deckenaufbauten gemessen und berechnet. In 64 % der Fälle lag die berechnete Resonanzfrequenz über und in 36 % der Fälle unter den gemessenen Werten. Zumeist lag die Berechnung somit auf der sicheren Seite. Es stellte sich heraus, dass verschiedene Einflüsse, wie z. B. die Federsteifigkeit von Abhängesystemen oder die Dämpfung von Trittschalldämmungen momentan jedoch noch nicht in den allgemein (normativ) verwendeten Berechnungsmethoden berücksichtigt werden. Bzgl. Abhängesysteme gibt es in der Literatur bereits Ansätze diese in die Berechnung mit aufzunehmen, es fehlten jedoch noch spezifische Daten hierzu. Um die Datenlage zu erweitern wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Abhängesysteme untersucht und aus den Messdaten Federsteifigkeiten bestimmt. Diese Daten werden zur Verfügung gestellt, womit die Berechnung der Resonanzfrequenzen exakter gestaltet werden kann. Andere Abhängesysteme sollten noch untersucht werden um die Datenbasis zu den Abhängesystemen zu erweitern.

Ein weiterer möglicher Grund für die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung könnte sein, dass die Hersteller die dynamische Steifigkeit von Trittschalldämmungen im Allgemeinen eher etwas steifer angeben, um auf der sicheren Seite zu liegen. Dies ist auch auf die Zuordnung der dynamischen Steifigkeit in „Stufen“ in der Angabe der Herstellerdatenblätter zurückzuführen, die auch die technischen Streuungen in der Herstellung und weitere Effekte

kompensieren sollen. Zudem weist das normative Messverfahren zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit an Kleinproben andere Randbedingungen auf als die Mess- und Einbausituation von ganzen Deckenkonstruktionen.

Bauteilkatalog

Zur Einschätzung der Resonanzfrequenzen typischer Holzdecken wurde ein diesbezüglicher Bauteilkatalog erstellt. Die Resonanzfrequenzen der Decken wie auch die bewerteten Norm-Trittschallpegel und Schalldämm-Maße, jeweils inkl. den Spektrum-Anpassungswerten, werden im Anhang bereitgestellt.

Prognose der Trittschalldämmung

Die Prognose der Trittschalldämmung im Gebäude nach dem differenzierten Verfahren kann in der Planung helfen sowohl das Trennbau teil (= Geschossdecke) als auch die flankierenden Bauteile richtig zu bemessen. Die nachträgliche Prognose der in diesem Projekt durchgeführten in situ Messungen hat gezeigt, dass es trotz vorhandener Pläne zu deutlichen Abweichungen zur Messung kommen kann. In 2 von 8 Fällen fehlte ein zuverlässiger bewerteter Norm-Trittschallpegel des Deckenaufbaus, worunter die Prognosegenauigkeit in weiterer Folge litt. Die Vergleiche haben gezeigt, dass es wesentlich ist, dass die Bauteile entsprechend der Planung ausgeführt werden und der Deckenaufbau bzgl. bewertetem Norm-Trittschallpegel zuverlässig bewertet werden kann. Im Idealfall liegen für den ausgeführten Deckenaufbau Labor-Messwerte vor. Abgesehen davon hat sich gezeigt, dass die Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwerts zu einer geringeren negativen Abweichung zwischen Messwert und Prognosewert führt.

Anforderungsdeskriptor „Resonanzfrequenz“

Der Anforderungsdeskriptor „Resonanzfrequenz“ wurde anhand des Beispiels von in situ-Messergebnissen von 100 zufällig ausgewählten Holzmassivdeckenkonstruktionen analysiert. Die Analysen haben ergeben, dass die Zuordnung einer Deckenkonstruktion zu einer Schallschutzklasse auf Basis der rechnerisch prognostizierten Resonanzfrequenz im Vergleich zu einer Zuordnung auf Basis des Spektrum-Anpassungswertes nach ÖNORM B 8115-5:2021 in den meisten Fällen zu einer schlechteren Schallschutzklasse führt. Die Analysen führten zu diesem Ergebnis, obwohl die minimale Resonanzfrequenz bei 3-Massenschwingersystemen anstatt der maximalen, wie ÖNORM B 8115-5:2021 vorgibt, verwendet wurde. Andererseits ist jedoch zu beachten, dass für die Auswertung, wo bekannt, die Angaben der dynamischen Steifigkeiten der Herstellerdatenblätter zugrunde gelegt wurden. Die Hersteller geben die dynamische Steifigkeit im Allgemeinen auf der sicheren Seite liegend eher etwas steifer an, was in Bezug auf eine Einteilung in Schallschutzklassen tendenziell zu einer schlechteren Bewertung führt.

Bei den im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Labor- und in situ-Messungen ist erkennbar, dass der „Peak“ im Terzbandverlauf des gemessenen Norm-Trittschallpegels nicht immer mit der messtechnisch ermittelten Resonanzfrequenz übereinstimmt. Zudem ist bei

manchen Terzbandverläufen der „Peak“ bzw. der Beginn des „steilen Abfalls“ nur schwer identifizierbar. Dieses Ergebnis wird von einer Korrelationsuntersuchung der Resonanzfrequenz aus gemessenen Trittschallpegel-„peaks“ mit den berechneten Werten bestätigt. Bei diesen Korrelationsuntersuchungen kommt jedoch noch die Unsicherheit der gewählten Materialkennwerte, insbesondere der dynamischen Steifigkeit der Trittschalldämmplatten, für die rechnerische Prognose hinzu. Auch bei einer weiteren Korrelationsuntersuchung der rechnerisch prognostizierten Resonanzfrequenz mit den Messwerten des Spektrum-Anpassungswertes konnte keine markante Korrelation abgeleitet werden. Somit stellt die „ODER“-Bedingung der Klasseneinteilung nach ÖNORM B 8115-5:2021 für Deckenkonstruktionen keine Bewertungsgleichwertigkeit dar.

Die in situ Messungen und Analysen des Anforderungsdeskriptors haben zudem gezeigt, dass man in einem Frequenzabstand von ca. 1,4-mal der Resonanzfrequenz zwar in der Regel von einem steilen Abfall im Trittschallpegel ausgehen kann, jedoch nicht ausgeschlossen wird, dass oberhalb der Resonanzfrequenz störende Peaks auftreten, die andere Ursachen haben. Hierzu sind noch weitergehende Untersuchungen angebracht.

5 Literaturverzeichnis

Bietz, Heinrich; Wittstock, Volker (2018): Untersuchungen zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit elastischer Dämmstoffe. Tagungsband, DAGA 2018, S. 649–652.

Blevins, Robert D. (2001): Formulas for natural frequency and mode shape. Reprint ed. Malabar, Florida: Krieger Publishing.

Blödt, Adrian (2020): Schallschutz im Holzbau – Differenzierte Flankenbewertung bei der Trittschallübertragung. Hg. v. Informationsdienst Holz. Berlin (Holzbau Handbuch, 3/3/2).

Hessinger, Joachim; Rabold, Andreas; Saß, Bernd; Schramm, Markus (2020): Schallschutz im Holzbau. Bauphysik Kalender 2020, S. 185–267.

Hierl, Dominik (2024): Entwicklung einer Messsystematik zur Bestimmung der Resonanzfrequenzen bei Holzdecken und Vergleich der Ergebnisse mit Berechnungsansätzen. Bachelorthesis. TH Rosenheim, Studiengang Innenausbau.

Hohmann, Rainer (2023): Materialtechnische Tabellen. Bauphysik Kalender 2023, S. 661–715.

Holzforschung Austria; TU Graz (Hg.): Sound.Wood.Austria. Steigerung der Planungssicherheit bei der Schallschutzkonzeptionierung von Gebäuden in österreichischer Holzbauweise. (Forschungsbericht, FFG-Nr.: 870818 [in Bearbeitung]).

Lux, Christian; Hierl, Dominik; Nusser, Bernd; Luckinger, Gustav; Neusser, Maximilian (2024): Resonanzfrequenzmessung von Decken- und Wandaufbauten. Tagungsband, DAGA 2024.

Mecking, Simon; Mutter, Tobias; Rabold, Andreas (2022): Verbesserung des Schalldämm-Maßes durch Vorsatzschalen im Holzmassivbau. Tagungsband, DAGA 2022, S. 329–332.

Rabold, Andreas; Schneider, Martin; Fischer, Heinz-Martin; Zeitler, Berndt (2020): Neue Berechnungsverfahren zur Trittschallübertragung. *Bauphysik* 42 (4), S. 160–172.

Rabold, Andreas; Schödel, Benjamin; Schanda, Ulrich (2019): Schalltechnische Optimierung von Unterdeckenabhängern. Tagungsband, DAGA 2019.

Saarinen, Pekka; Keränen, Jukka; Hongisto, Valtteri (2024): Dynamic properties of resilient studs used in soundproof multilayer constructions – Measurement method and database. *Construction and Building Materials* 433, S. 136629.

DIN 4109-2:2018: Schallschutz im Hochbau - Teil 2: Rechnerischer Nachweis der Erfüllung der Anforderungen.

DIN 4109-33:2016: Schallschutz im Hochbau - Teil 33: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Holz-, Leicht- und Trockenbau.

Schödel, Benjamin (2018): Ermittlung schalltechnischer Beurteilungskriterien für Unterdeckenabhängern und Trittschalldämmplatten. Bachelorarbeit. Technische Hochschule Rosenheim, Studiengang Holzbau und Ausbau.

Stenitzer, Alexander; Nusser, Bernd; Lux, Christian (2024): Trittschallschutz durch verbesserte Flanken. Teil 1: Holzrahmenbauweise. *Holzbau - die neue quadriga*. Heft 3, S. 44–47.

Vavrik-Kirchsteiger, Selina; Ferk, Heinz (2024a): Resonant frequencies of multi-layer building constructions: Estimation by measurement of acceleration amplitudes. *Proceedings, Inter-Noise 2024*.

Vavrik-Kirchsteiger, Selina; Ferk, Heinz (2024b): Sound.Wood.Austria - Messtechnische und Rechnerische Ermittlung der Resonanzfrequenzen von Mehrmassenschwingern von Bauteilen im Prüfstand. [Vorabzug]. TU Graz (Messbericht, B18.686.110.702).

Zürcher, Christoph; Frank, Thomas (2021): *Bauphysik*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich (Bau & Energie).

Anhang 1: Mess- und Auswerteanleitung

1. Begriffe

Beschleunigungspegel

Der Momentanwert der Beschleunigung eines Schwingungssystems in Dezibel (dB) bezogen auf einen Referenzwert. Er gibt das Verhältnis der momentanen Beschleunigung zu einem festgelegten Referenzbeschleunigungswert an (10^{-6} m/s^2)

Örtlicher Mittlerer Beschleunigungspegel

Der Durchschnittswert der Beschleunigungspegel über einen definierten räumlichen Bereich. Er gibt die durchschnittliche Schwingungsintensität an einem bestimmten Ort des Systems an.

Phasendifferenz

Phasendifferenz: Der Unterschied in der Phase zwischen zwei Schwingungswellen, gemessen in Grad oder Radiant. Sie beschreibt die Verschiebung der Phasenlage eines Signals im Vergleich zu einem Referenzsignal.

Kreuzleistungsdichtespektrum $R_{12}(\tau)$

Kreuzleistungsdichtespektrum: Das Spektrum, das die Beziehung zwischen zwei Signalen im Frequenzbereich beschreibt, berechnet durch die Fourier-Transformation der Kreuzkorrelationsfunktion. Es zeigt die Abhängigkeit der Signale voneinander in Bezug auf die Zeitverzögerung τ .

2. Grundlagen

Spezifikationen und Kalibrierung der Schwingungswandler müssen ISO 7626-1 genügen. Die Filter müssen die Anforderungen für Geräte der Klasse 1 nach IEC 61260 (alle Teile) erfüllen.

Für das Messverfahren „Phasendifferenz“ ist ein zumindest zweikanaliges Analysesystem erforderlich mit phasensynchronen Eingangskanälen.

2.1. Körperschallerzeugung an der Bauteiloberfläche

Die Anregung kann durch Einzelschläge mit einem Hammer (z.B. Impulshammer) oder einem Fallgewicht erfolgen. Alle Hammerschläge sollten mit etwa gleicher Kraft auf möglichst einem Anregungspunkt je Messpunkt erfolgen. Bei der Benutzung eines Fallgewichts (z.B. Gummiball) ist die Fallhöhe in etwa gleichbleibend für alle Anregungspunkte zu halten.

Der am Bauteil gemessene Beschleunigungspegel muss in jedem Frequenzband mindestens 10 dB höher sein als der Hintergrundpegel. Da unterschiedliche Werkstoffe zu unterschiedlichen Anregungen in Frequenzbändern führen, kann es vorteilhaft sein, für den Schlaghammer verschiedene Massen und Werkstoffe zu verwenden, um einen Signalrausch-Abstand von mindestens 10 dB in jedem Frequenzband sicherzustellen.

Um die Möglichkeiten des Messsystems optimal zu nutzen ist es empfohlen den Frequenzbereich der Anregung einzuschränken. Das ist durch eine Veränderung des Gewichts und der Steifigkeit der Kontaktfläche des Hammers, oder Fallgewichts möglich. In der Regel ist für die zu erwartenden Resonanzfrequenzen (< 200 Hz) eine Reduktion der Steifigkeit und eine Erhöhung des Gewichts und damit eine Reduktion des Frequenzbereichs der Anregung vorteilhaft.

Zu vermeiden ist jedenfalls eine mehrfache Berührung des Hammers mit der Bauteiloberfläche während der Messung („Double Hits“).

Die Kraftaufbringung ist möglichst senkrecht auf die Oberfläche durchzuführen.

2.2. Schwingungsmessung

Schwingungsmessungen müssen mit Beschleunigungsmessgeräten durchgeführt werden, die direkt auf der Oberfläche des zu prüfenden Bauteils montiert sind. Diese müssen eine ausreichende Empfindlichkeit und geringes Rauschen aufweisen, um ein Signal-Rausch-Verhältnis der Messkette zu erreichen, das ausreicht, um den Dynamikbereich des Frequenzverhaltens des Bauteils im interessierenden Frequenzbereich zu umfassen. Die Fixierung des Beschleunigungsmessgerätes am zu prüfenden Bauteil sollte in der Richtung senkrecht zur Bauteiloberfläche steif sein, sodass nur vertikale Schwingungen (d.h. ohne Rotationsanteile) gemessen werden.

Hierbei ist die Verwendung von Bienenwachs oder Wachsen auf Erdölbasis eine einfache Lösung, jedoch kann eine schwache Fixierung zu Messfehlern im oberen Frequenzbereich führen. Wenn die Oberflächenstruktur die Verwendung von Wachs nicht zulässt, können kleine metallische Unterlegscheiben auf die Oberfläche geklebt/zementiert werden, um eine Fixierung mit Wachs oder über einen Zapfen/einen Magneten auf der Unterlegscheibe zu ermöglichen (siehe ISO 5348). (10848-1 7.2.3)

Anforderungen an die Masse des Beschleunigungsmessgeräts entsprechend 10848-1 7.2.3 / ISO 7626-1

Wird ein Analysesystem mit mehr als einem Kanal für eine gleichzeitige Messung mehrerer Messpositionen eingesetzt ist die Signalkette entsprechend ISO 7626-1 zu kalibrieren.

2.3. Frequenzbereich der Messung

Die Auflösung der resultierenden FFT Analyse der gemessenen Signale sollte fein genug sein um die zu Bestimmende Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenz mit ausreichender Sicherheit (Abstand zum nachzuweisenden Anforderungsniveau) bestimmt werden kann. Die Schrittweite, in Hertz, die aus einer diskreten Fourier Transformation resultiert ist somit in Abhängigkeit von Abtastrate und Signallänge entsprechend zu wählen. Unabhängig von der Schrittweite in der Frequenz sollte die Abtastrate mindestens höher als das zehnfache des nachzuweisenden Anforderungsniveaus sein. (ISO 76726-2:2015). Die Signallänge ist mindestens so lange zu wählen, dass die nach der Anregung auftretenden Oberflächenflächenbeschleunigungen wieder auf das Niveau des Grundrauschpegels abgeklungen sind.

3. Messverfahren

3.1. Auswahl des Messverfahrens

Das Messverfahren ist auf Basis der vorliegenden Konstruktion nach Tabelle 42 zu bestimmen.

Tabelle 42: Auswahl des Messverfahrens auf Basis des Anwendungsbereichs (Art der Deckenkonstruktion, dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmung und Flächengewicht des Estrichs)

Anwendungsbereich	$L_{i,Fmax,V,T}$	Scherenmethode	Phasendifferenz	Modalanalyse
Homogene Grunddeckenkonstruktionen mit schweren Estrichen ($m' > 120 \text{ kg/m}^2$) und Trittschalldämmungen mit $s' < 20 \text{ MN/m}^3$	anwendbar	anwendbar	anwendbar	anwendbar
Homogene und Inhomogene Deckenkonstruktionen mit schweren Estrichen ($m' > 100 \text{ kg/m}^2$) und Trittschalldämmungen mit $s' < 50 \text{ MN/m}^3$	bedingt anwendbar	bedingt anwendbar	anwendbar	anwendbar
Andere	nicht anwendbar	nicht anwendbar	nicht anwendbar	anwendbar

3.2. Ballmessung zur Bestimmung von $L_{i,Fmax,V,T}$

Das Verfahren ist vor allem bei $f_R \ll f_{R,Anforderung}$ anwendbar, wobei eine Terzband-Auflösung von $L_{i,Fmax,V,T}$ im Frequenzbereich als ausreichend erachtet wird. Wobei dann die obere Terzabandgrenzfrequenz kleiner sein sollte als die nachzuweisende Anforderung von f_R .

Beschreibung und Anforderungen entsprechend ÖNORM EN ISO 10140-3:2021.

3.3. Phasendifferenz

3.3.1. Allgemeines

Die Lage der Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenz wird aufgrund der auftretenden Amplitudenspitze in der über alle Messpunkte örtliche gemittelte Kreuzkorrelationsfunktion $R_{o,u}(\tau)$ oder $R_{F,o,u}(\tau)$ bestimmt. Zur Einschränkung des Frequenzbereichs der Lage der Amplitudenspitze der Masse-Feder-Masse Resonanz dient der Phasenwinkel $\phi(f)$ zwischen den beiden Zeitsignalen der Beschleunigungspegel an Ober- $a_o(t)$ und Unterseite $a_u(t)$ oder der Phasenwinkel $\phi(f)$ zwischen den beiden Zeitsignalen des Kraft- $F_o(t)$ an der Oberseite und des Beschleunigungspegels Unterseite $v_u(t)$ des Bauteils und die Ausbildung einer mit der Frequenz zunehmenden Divergenz der mittleren Beschleunigungspegeln an Ober- $a_o(t)$ und Unterseite $a_u(t)$.

Für das Messverfahren ist das Verwenden eines zumindest zweikanaligen Analysesystems mit phasensynchronen Messkanälen erforderlich.

3.3.2. Anregungs- und Messpositionen

In den in Abbildung 78 dargestellten Zonen sind je Zone drei zufällig gleichmäßig verteilte Messpunkte auszuwählen an denen die Beschleunigungen an der Ober- und Unterseite des Bauteils bestimmt werden. Die Messpunkte an der Ober- und Unterseite sind je Messposition übereinander zu platzieren und gleichzeitig zu messen. Je Messposition sind fünf Anregungen der Struktur durchzuführen. Für jede Anregung ist eine eigene Messung durchzuführen. Die einzelnen Messungen und die daraus resultierende Kreuzleistungsdichtespektrum zwischen $a_o(t)$ oder $F_o(t)$ an der Ober- und $a_u(t)$ Unterseite sind je Messposition zu mitteln.

Bei Vorliegen einer abgehängten Decke ist das beschriebene Messverfahren dazu geeignet die niedrige Masse-Feder-Masse Frequenz des schwimmenden Estrichs oder der abhängten Decke zu bestimmen.

Die Anregung des Bauteils, durch die in 2.1 beschriebene Körperschallquelle, sollte möglichst nahe an der jeweiligen Messposition durchgeführt werden.

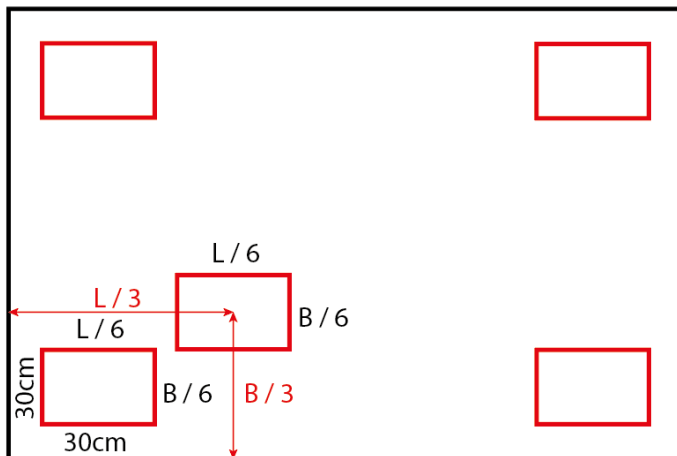


Abbildung 78: Messzonen die Bestimmung der Masse-Feder-Masse Resonanz mittels des „Phasendifferenz“ Verfahrens

3.3.3. Bestimmung der Phasendifferenz

Beschleunigung / Beschleunigung

Zur Berechnung der Phasendifferenz zwischen den beiden Zeitsignalen der Beschleunigungspegel an Ober- $a_o(t)$ und Unterseite $a_u(t)$ des Bauteils ist die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{o,u}(\tau)$ der beiden Signale zu bestimmen. Die beiden Pegelzeitverläufe werden als $a_o(t)$ und $a_u(t)$ definiert, wobei t die Zeit darstellt. Die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{o,u}(\tau)$ zwischen den beiden Signalen $a(t)$ und $a_u(t)$ wird wie folgt definiert:

$$R_{o,u}(\tau) = \int a(t)a_u(t + \tau)dt$$

Um die Phasendifferenz als Funktion der Frequenz zu bestimmen, kann die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{o,u}(f)$ in den Frequenzbereich transformiert und damit das Kreuzleistungsspektrum berechnet werden werden

$$S_{o,u}(f) = F[R_{o,u}(\tau)]$$

wobei f die Frequenz ist und F die Fourier-Transformation darstellt. Der Phasenfrequenzgang $\phi(f)$ kann dann aus dem Kreuzleistungsspektrum zwischen den beiden Signalen $v_o(t)$ und $v_u(t)$ ist dann gegeben durch:

$$\phi(f) = \arg(S_{o,u}(f))$$

wobei $\phi(f)$ den Phasenwinkel bezeichnet.

Kraft / Beschleunigung

Zur Berechnung der Phasendifferenz zwischen den beiden Zeitsignalen des Kraft- $F_o(t)$ an der Oberseite und des Beschleunigungspegels Unterseite $a_u(t)$ des Bauteils ist die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{o,u}(\tau)$ der beiden Signale zu bestimmen. Die beiden

Pegelzeitverläufe werden als $F_o(t)$ und $a_u(t)$ definiert, wobei t die Zeit darstellt. Die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{F,o,u}(\tau)$ zwischen den beiden Signalen $F_o(t)$ und $a_u(t)$ wird wie folgt definiert:

$$R_{F,o,u}(\tau) = \int T_o(t)a_u(t + \tau)dt$$

Um die Phasendifferenz als Funktion der Frequenz zu bestimmen, kann die Kreuzkorrelationsfunktion $R_{F,o,u}(f)$ in den Frequenzbereich transformiert und damit das Kreuzleistungsspektrum berechnet werden werden

$$S_{F,o,u}(f) = F[R_{F,o,u}(\tau)]$$

wobei f die Frequenz ist und F die Fourier-Transformation darstellt. Der Phasenfrequenzgang $\phi(f)$ kann dann aus dem Kreuzleistungsspektrum zwischen den beiden Signalen $v_o(t)$ und $v_u(t)$ ist dann gegeben durch:

$$\phi_F(f) = \arg(S_{F,o,u}(f))$$

wobei $\phi(f)$ den Phasenwinkel bezeichnet.

3.3.4. Hilfestellungen zur Bestimmung von f_R mittels der Phasendifferenzenmethode

3.3.4.1. Spreizung Amplituden- und Phasen Maximum

Die Lage im Frequenzspektrum des zu erwarteten Amplituden Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion, zur Identifikation der Masse-Feder-Masse Resonanz, und dem Maximum der Phasendifferenz unterscheidet sich in Abhängigkeit des Dämpfungskoeffizienten c der Trittschalldämmung und des Verhältnisses der Flächengewichte des Estrichs m_1 und des Grunddeckensystems m_2 . Als Hilfestellung zur Lokalisierung der Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenz dient daher Abbildung 79 die die zu erwartende Verschiebung im Frequenzbereich in Abhängigkeit von m_1/m_2 und c darstellt.

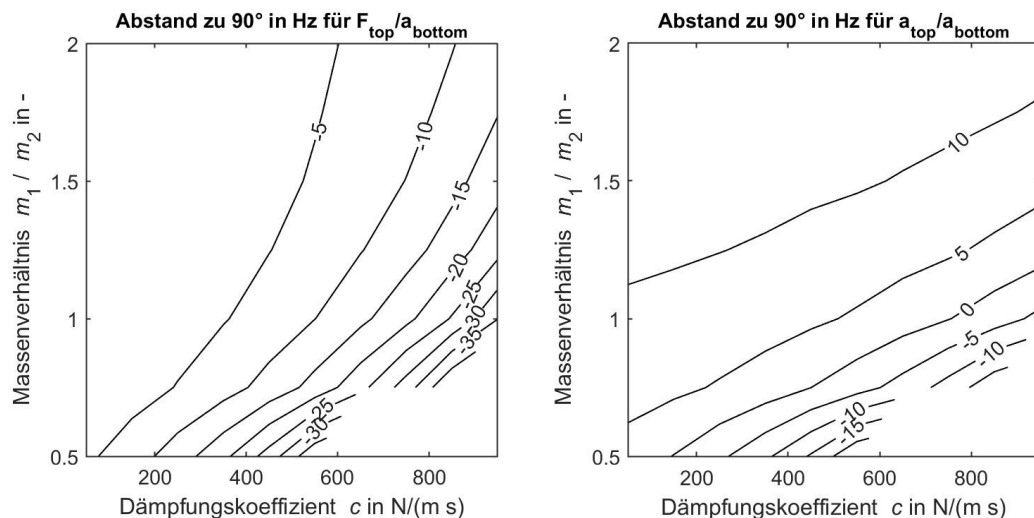


Abbildung 79: Auf Basis einer Simulation eines Zweimassenschwingers ermittelte Zusammenhang zwischen Masseverhältnis, Dämpfungskoeffizienten und Versatz zwischen den Maxima der Amplitude und des Phasenwinkels der Kreuzkorrelationsfunktion $S_{o,u}(\tau)$

Anhang 2: Bestimmung der Messzonen

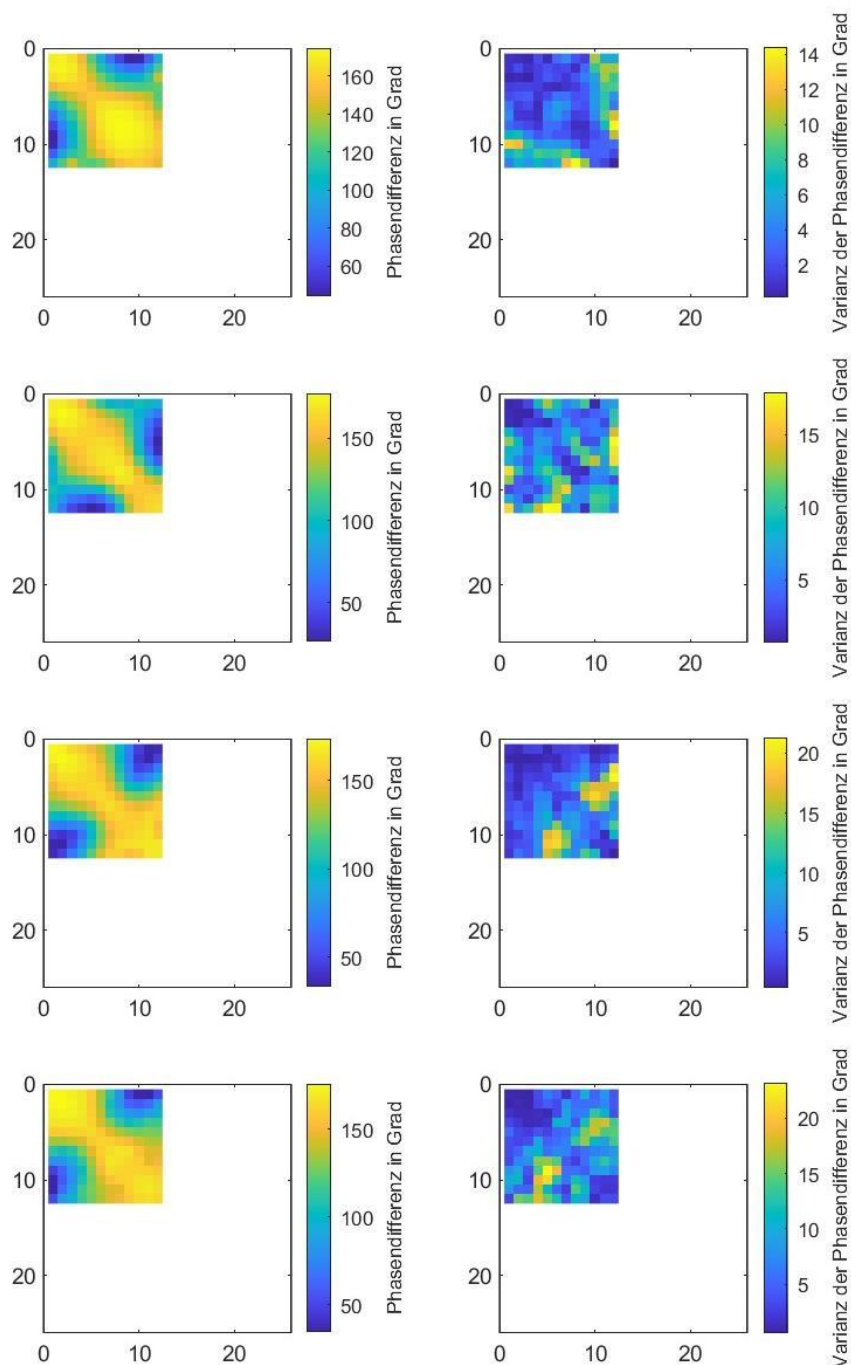


Abbildung 80: Darstellung der gemittelten Phasendifferenz für jeden Anregungspunkt im Quadranten innerhalb eines Radius von 20 cm gemittelt (links) und der in diesem Bereich auftretenden Varianz der Phasendifferenz (rechts) für ein Deckensystems aus Betondecke (18 cm) schwimmenden Estrichs (6 cm) mit einer Trittschalldämmplatte ($s' = 5; 22; 50; 91 \text{ MN/m}^3$) mit den Abmessungen 5 m x 5 m bei den jeweiligen Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenzen der Systeme (von oben nach unten: 35Hz, 74Hz, 111Hz, 150Hz), die Randbedingung der Ecken ist „frei aufgelagert“

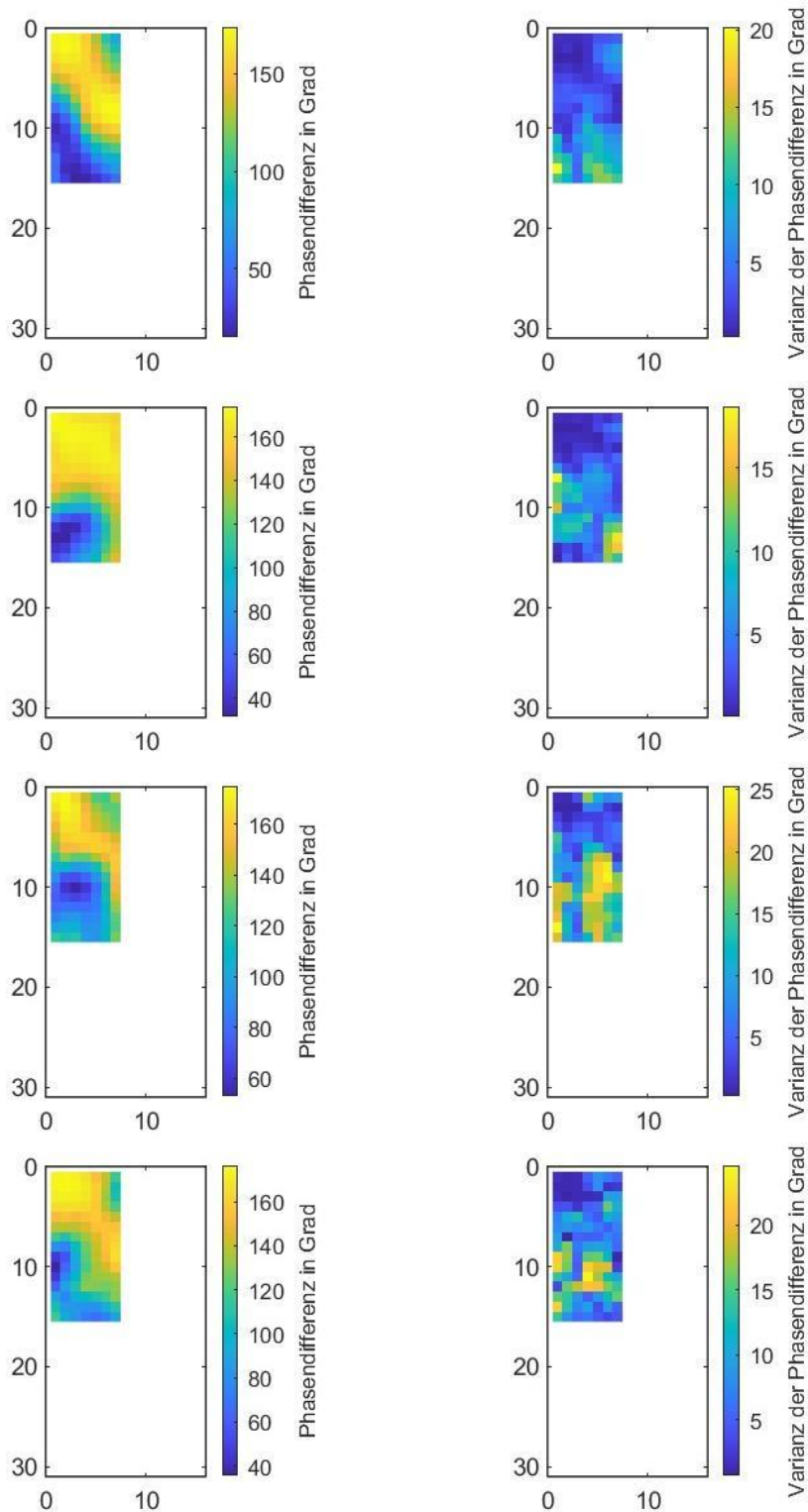


Abbildung 81: Darstellung der gemittelten Phasendifferenz für jeden Anregungspunkt im Quadranten innerhalb eines Radius von 20 cm gemittelt (links) und der in diesem Bereich auftretenden Varianz der Phasendifferenz (rechts) für ein Deckensystem aus Betondecke (18cm) schwimmenden Estrichs (6cm) mit einer Trittschalldämmplatte ($s'=5; 22; 50; 91 \text{ MN/m}^3$) mit den Abmessungen 6m x 3m bei den jeweiligen Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenzen der Systeme (von oben nach unten: 35Hz, 74Hz, 111Hz, 150Hz), die Randbedingung der Ecken ist „frei aufgelagert“

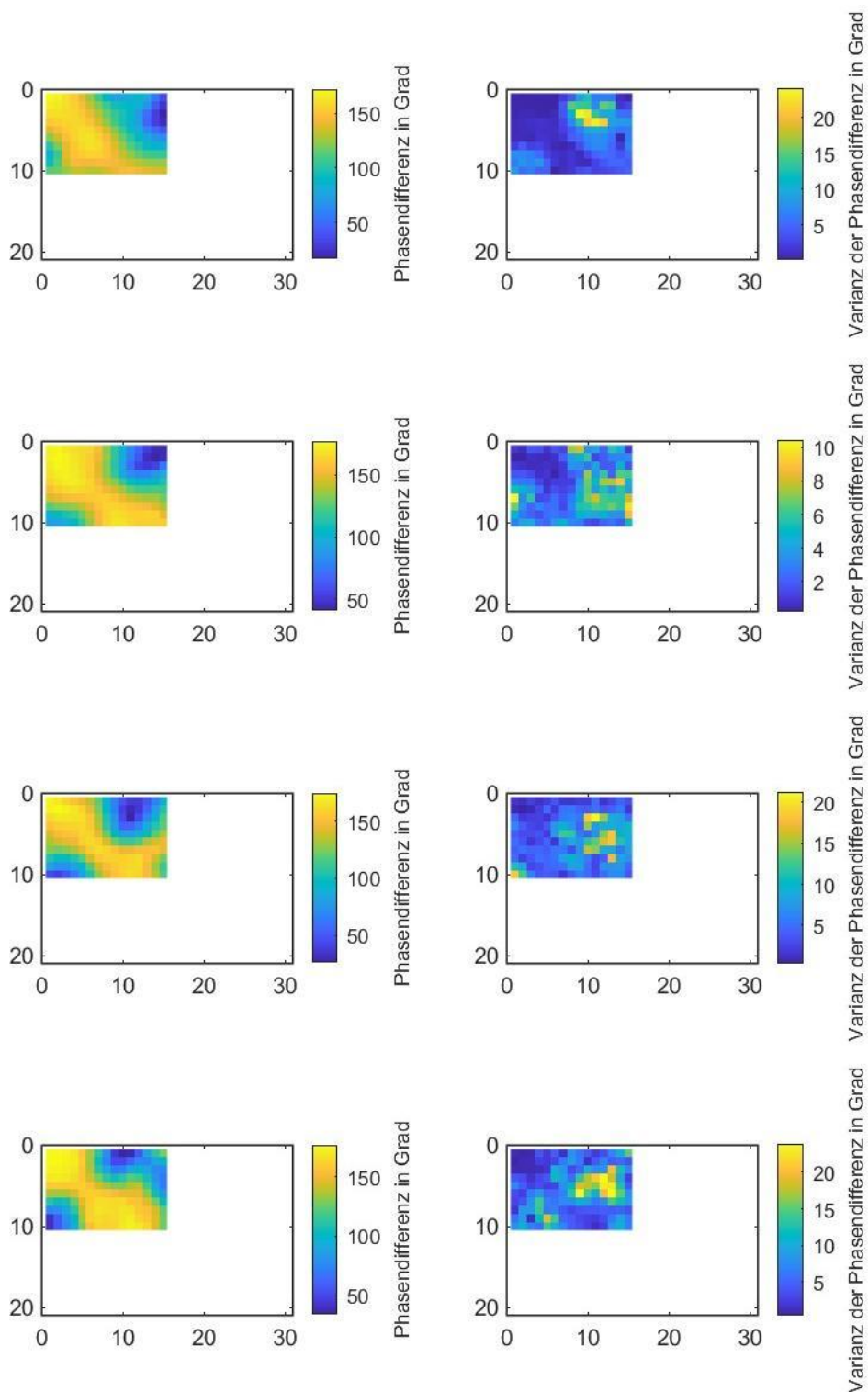


Abbildung 82: Darstellung der gemittelten Phasendifferenz für jeden Anregungspunkt im Quadranten innerhalb eines Radius von 20 cm gemittelt (links) und der in diesem Bereich auftretenden Varianz der Phasendifferenz (rechts) für ein Deckensystems aus Betondecke (18cm) schwimmenden Estrichs (6cm) mit einer Trittschalldämmplatte ($s'=5; 22; 50; 91 \text{ MN/m}^3$) mit den Abmessungen 6m x 4m bei den jeweiligen Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenzen der Systeme (von oben nach unten: 35Hz, 74Hz, 111Hz, 150Hz), die Randbedingung der Ecken ist „frei aufgelagert“

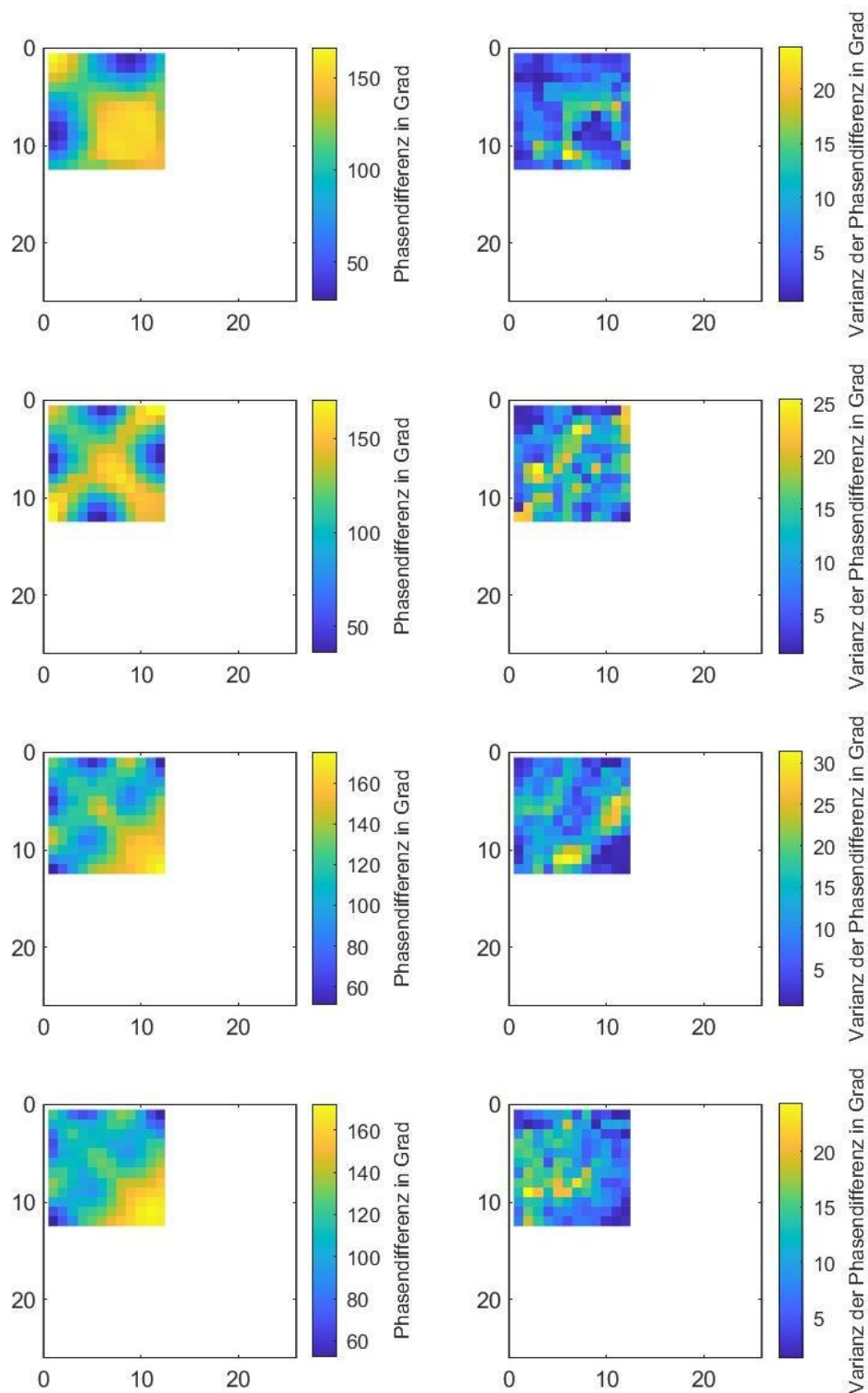


Abbildung 83: Darstellung der gemittelten Phasendifferenz für jeden Anregungspunkt im Quadranten innerhalb eines Radius von 20 cm gemittelt (links) und der in diesem Bereich auftretenden Varianz der Phasendifferenz (rechts) für ein Deckensystem aus Betondecke (18cm) schwimmenden Estrichs (6cm) mit einer Trittschalldämmplatte ($s'=5; 22; 50; 91 \text{ MN/m}^3$) mit den Abmessungen 5m x 5m bei den jeweiligen Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenzen der Systeme (von oben nach unten: 35Hz, 74Hz, 111Hz, 150Hz), die Randbedingung der Ecken ist „eingespannt“

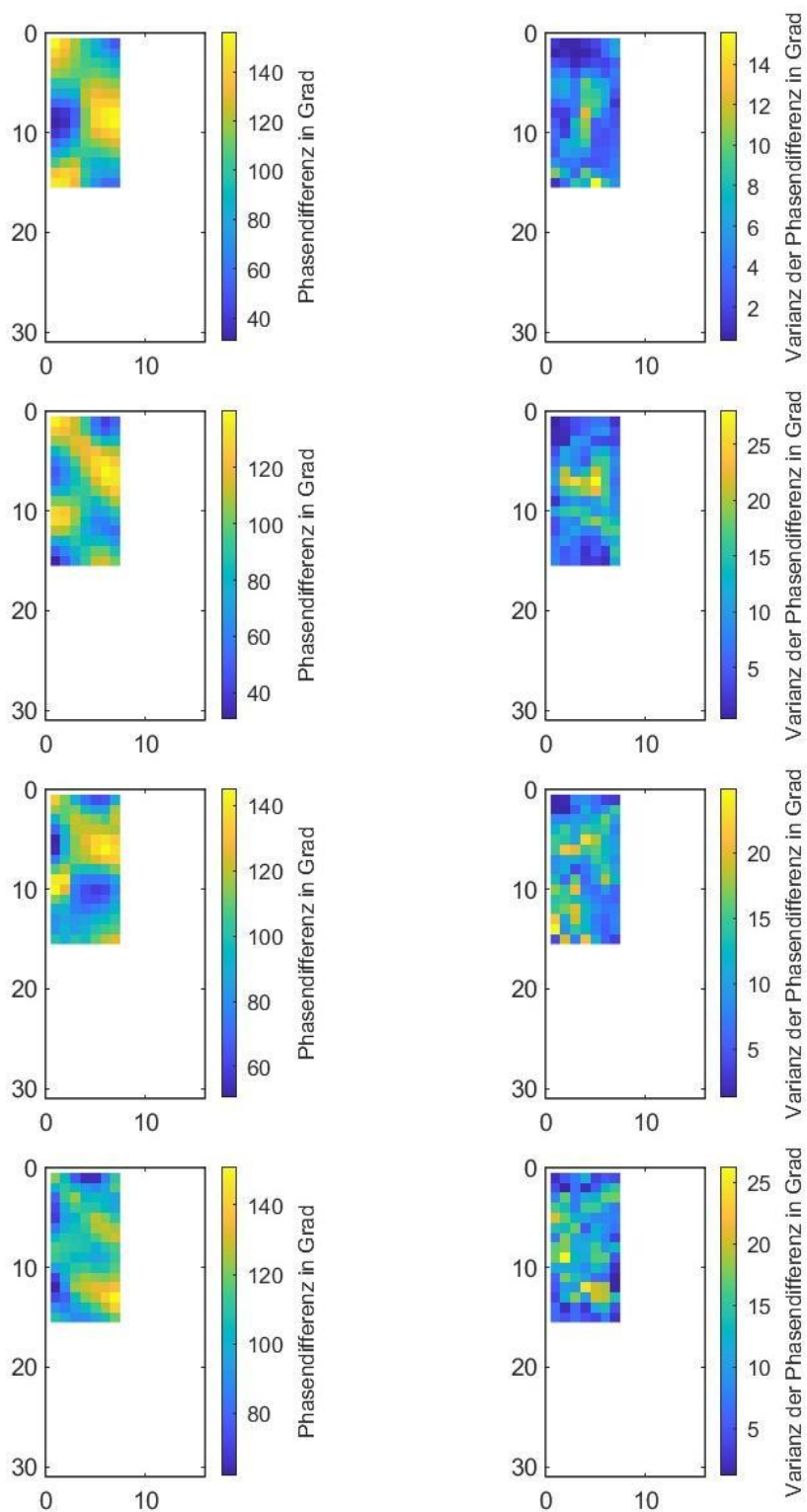


Abbildung 84: Darstellung der gemittelten Phasendifferenz für jeden Anregungspunkt im Quadranten innerhalb eines Radius von 20 cm gemittelt (links) und der in diesem Bereich auftretenden Varianz der Phasendifferenz (rechts) für ein Deckensystem aus Betondecke (18cm) schwimmenden Estrichs (6cm) mit einer Trittschalldämmplatte ($s' = 5; 22; 50; 91 \text{ MN/m}^3$) mit den Abmessungen 6m x 3m bei den jeweiligen Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenzen der Systeme (von oben nach unten: 35Hz, 74Hz, 111Hz, 150Hz), die Randbedingung der Ecken ist „eingespannt“

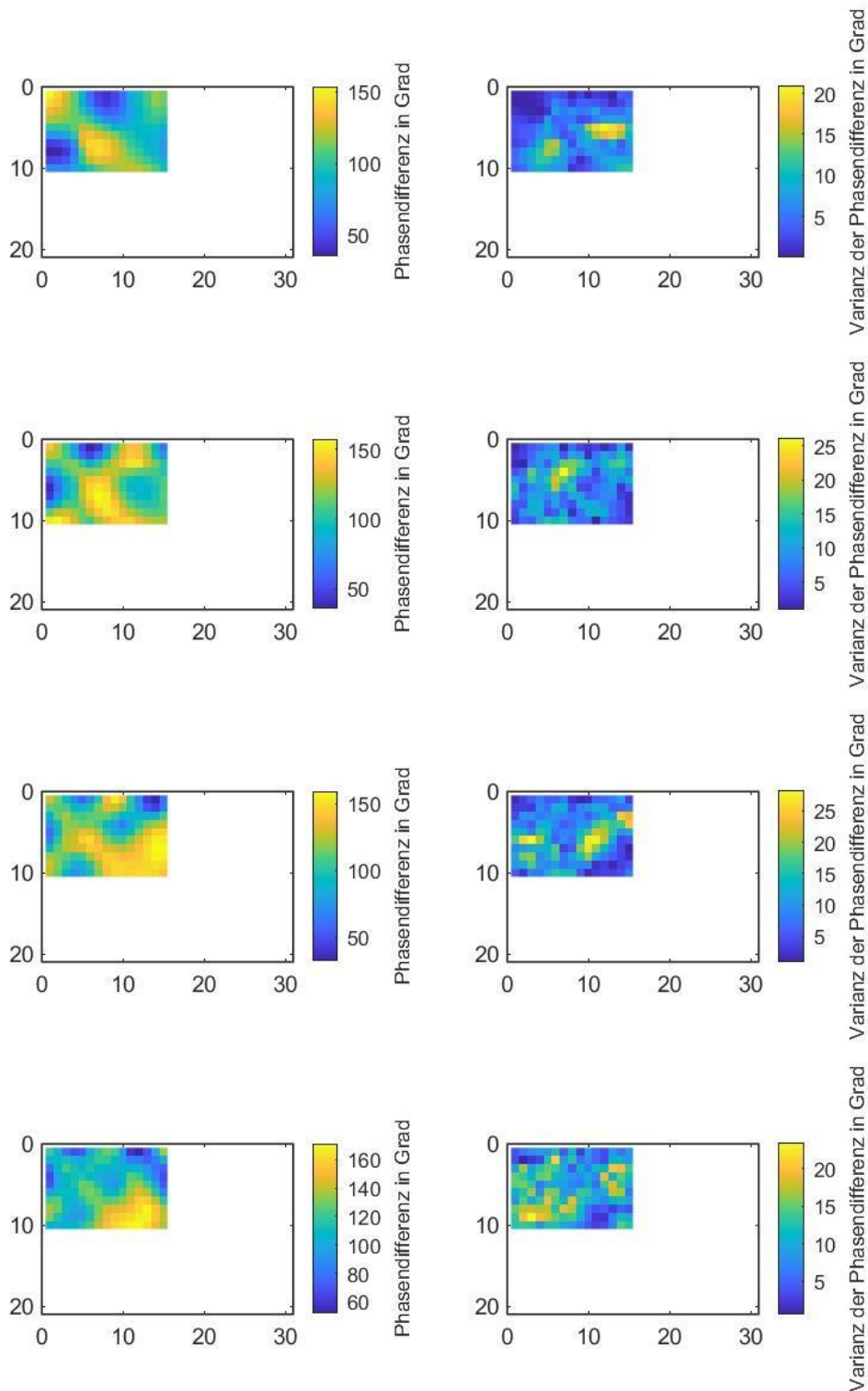


Abbildung 85: Darstellung der gemittelten Phasendifferenz für jeden Anregungspunkt im Quadranten innerhalb eines Radius von 20 cm gemittelt (links) und der in diesem Bereich auftretenden Varianz der Phasendifferenz (rechts) für ein Deckensystems aus Betondecke (18 cm) schwimmenden Estrichs (6 cm) mit einer Trittschalldämmplatte ($s'=5; 22; 50; 91 \text{ MN/m}^3$) mit den Abmessungen 6m x 4m bei den jeweiligen Masse-Feder-Masse Resonanzfrequenzen der Systeme (von oben nach unten: 35Hz, 74Hz, 111Hz, 150Hz), die Randbedingung der Ecken ist „eingespannt“.

Anhang 3: Bauteilkatalog Decken

Die nachfolgenden Bauteile stammen aus www.dataholz.eu oder dem Forschungsprojekt Sound.Wood.Austria (Holzforschung Austria und TU Graz) und zeigen beispielhafte Aufbauten. Weitere, von akkreditierten Prüfanstalten freigegebene Aufbauten können der Bauteildatenbank www.dataholz.eu kostenfrei entnommen werden.

Angaben zu Materialdaten in den nachfolgenden Tabellen:

Bsp.: Mineralwolle [040¹; ≥30²; ≥1000°C³]

¹ Wärmeleitfähigkeit in mW/m.K

² Rohdichte in kg/m³

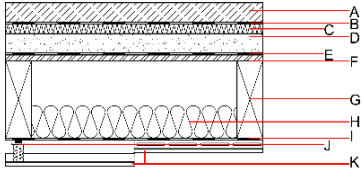
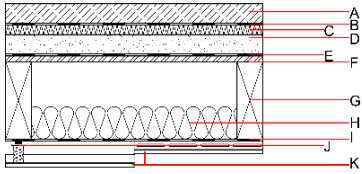
³ Schmelztemperatur in °C

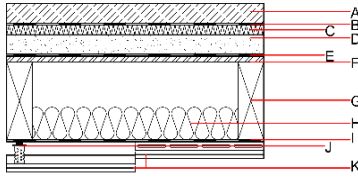
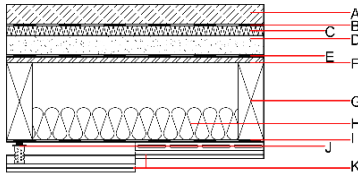
e: Achsmaß in mm

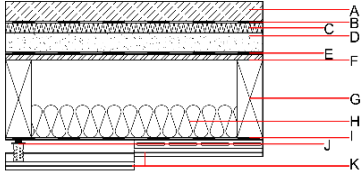
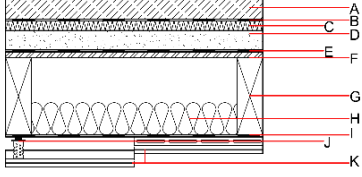
a: Schraubenabstand in mm

s_d: Diffusionsequivalente Luftschichtdicke in m

Tabelle 43: Bewertete Schalldämm-Maße R_w und Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ von Trenndecken in Holzrahmenbauweise

Zeile	Trenndecken - Holzbalkendecken		$L_{n,w}$ (C_1 ; $C_{150-2500}$) in dB	R_w (C ; C_{tr}) in dB																																				
1.1	 <p data-bbox="371 907 655 936">dataholz-ID gdrnxa11a-00/01</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Dicke</th> <th>Baustoff</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>60,0</td> <td>Zementestrich 150 kg/m²</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>-</td> <td>Trennschicht Kunststoff</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>30,0</td> <td>Trittschalldämmung MW-T [$s'=10MN/m^2$]</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>60,0</td> <td>Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m²)</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>18,0</td> <td>OSB</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>240,0</td> <td>Konstruktionsholz (80/ ..; e=300)</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>100,0</td> <td>Mineralwolle [038; ≥ 30; $\geq 1000^\circ C$]</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>J</td> <td>27,0</td> <td>Federschiene (a=400)</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>12,5</td> <td>Gipsplatte Typ DF (GKF) oder Gipsfaserplatte</td> </tr> </tbody> </table>		Dicke	Baustoff	A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²	B	-	Trennschicht Kunststoff	C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [$s'=10MN/m^2$]	D	60,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m ²)	E	-	Rieselschutz	F	18,0	OSB	G	240,0	Konstruktionsholz (80/ ..; e=300)	H	100,0	Mineralwolle [038; ≥ 30 ; $\geq 1000^\circ C$]	I	-	Rieselschutz	J	27,0	Federschiene (a=400)	K	12,5	Gipsplatte Typ DF (GKF) oder Gipsfaserplatte	<p>42 (2; 14)</p>	<p>83 (-9; -17)</p>
	Dicke	Baustoff																																						
A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²																																						
B	-	Trennschicht Kunststoff																																						
C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [$s'=10MN/m^2$]																																						
D	60,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m ²)																																						
E	-	Rieselschutz																																						
F	18,0	OSB																																						
G	240,0	Konstruktionsholz (80/ ..; e=300)																																						
H	100,0	Mineralwolle [038; ≥ 30 ; $\geq 1000^\circ C$]																																						
I	-	Rieselschutz																																						
J	27,0	Federschiene (a=400)																																						
K	12,5	Gipsplatte Typ DF (GKF) oder Gipsfaserplatte																																						
			<p>Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 35$ Hz $f_{02,Ber} = 65$ Hz</p>																																					
1.2	 <p data-bbox="371 1630 655 1659">dataholz-ID gdrnxa11a-00/01</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Dicke</th> <th>Baustoff</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>60,0</td> <td>Zementestrich 150 kg/m²</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>-</td> <td>Trennschicht Kunststoff</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>30,0</td> <td>Trittschalldämmung MW-T [$s'=10MN/m^2$]</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>60,0</td> <td>Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m²)</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>18,0</td> <td>OSB</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>240,0</td> <td>Konstruktionsholz (80/ ..; e=300)</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>100,0</td> <td>Mineralwolle [038; ≥ 30; $\geq 1000^\circ C$]</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>J</td> <td>60,0</td> <td>Direktabhänger entkoppelt mit CD-Profil (a=400)</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>12,5</td> <td>Gipsplatte Typ DF (GKF) oder Gipsfaserplatte</td> </tr> </tbody> </table>		Dicke	Baustoff	A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²	B	-	Trennschicht Kunststoff	C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [$s'=10MN/m^2$]	D	60,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m ²)	E	-	Rieselschutz	F	18,0	OSB	G	240,0	Konstruktionsholz (80/ ..; e=300)	H	100,0	Mineralwolle [038; ≥ 30 ; $\geq 1000^\circ C$]	I	-	Rieselschutz	J	60,0	Direktabhänger entkoppelt mit CD-Profil (a=400)	K	12,5	Gipsplatte Typ DF (GKF) oder Gipsfaserplatte	<p>37 (2; 19)</p>	<p>85 (-9; -17)</p>
	Dicke	Baustoff																																						
A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²																																						
B	-	Trennschicht Kunststoff																																						
C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [$s'=10MN/m^2$]																																						
D	60,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m ²)																																						
E	-	Rieselschutz																																						
F	18,0	OSB																																						
G	240,0	Konstruktionsholz (80/ ..; e=300)																																						
H	100,0	Mineralwolle [038; ≥ 30 ; $\geq 1000^\circ C$]																																						
I	-	Rieselschutz																																						
J	60,0	Direktabhänger entkoppelt mit CD-Profil (a=400)																																						
K	12,5	Gipsplatte Typ DF (GKF) oder Gipsfaserplatte																																						
			<p>Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 33$ Hz $f_{02,Ber} = 65$ Hz</p>																																					

Zeile	Trenndecken - Holzbalkendecken	$L_{n,w}$ (C_i ; $C_{150-2500}$) in dB	R_w (C ; C_{tr}) in dB																																								
2.1	 <p data-bbox="331 815 616 842">dataholz-ID gdrnxa11b-00/01</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Dicke</th> <th>Baustoff</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>60,0</td> <td>Zementestrich 150 kg/m²</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>-</td> <td>Trennschicht Kunststoff</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>30,0</td> <td>Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m³]</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>60,0</td> <td>Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m²)</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>18,0</td> <td>OSB</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>240,0</td> <td>Konstruktionsholz (80/ ...; e=300)</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>100,0</td> <td>Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>J</td> <td>27,0</td> <td>Federschiene (a=400)</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>25,0</td> <td>Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm</td> </tr> </tbody> </table>		Dicke	Baustoff	A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²	B	-	Trennschicht Kunststoff	C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]	D	60,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m ²)	E	-	Rieselschutz	F	18,0	OSB	G	240,0	Konstruktionsholz (80/ ...; e=300)	H	100,0	Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]	I	-	Rieselschutz	J	27,0	Federschiene (a=400)	K	25,0	Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>38 (-2; 15)</td> <td>86 (-8; -17)</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"> Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 25$ Hz $f_{02,Ber} = 65$ Hz </td> </tr> </tbody> </table>	38 (-2; 15)	86 (-8; -17)	Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 25$ Hz $f_{02,Ber} = 65$ Hz	
	Dicke	Baustoff																																									
A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²																																									
B	-	Trennschicht Kunststoff																																									
C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]																																									
D	60,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m ²)																																									
E	-	Rieselschutz																																									
F	18,0	OSB																																									
G	240,0	Konstruktionsholz (80/ ...; e=300)																																									
H	100,0	Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]																																									
I	-	Rieselschutz																																									
J	27,0	Federschiene (a=400)																																									
K	25,0	Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm																																									
38 (-2; 15)	86 (-8; -17)																																										
Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 25$ Hz $f_{02,Ber} = 65$ Hz																																											
2.2	 <p data-bbox="331 1453 616 1480">dataholz-ID gdrnxa11b-00/01</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Dicke</th> <th>Baustoff</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>60,0</td> <td>Zementestrich 150 kg/m²</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>-</td> <td>Trennschicht Kunststoff</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>30,0</td> <td>Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m³]</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>60,0</td> <td>Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m²)</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>18,0</td> <td>OSB</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>240,0</td> <td>Konstruktionsholz (80/ ...; e=300)</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>100,0</td> <td>Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>J</td> <td>60,0</td> <td>Direktabhängler entkoppelt mit CD-Profil (a=400)</td> </tr> <tr> <td>K</td> <td>25,0</td> <td>Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm</td> </tr> </tbody> </table>		Dicke	Baustoff	A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²	B	-	Trennschicht Kunststoff	C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]	D	60,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m ²)	E	-	Rieselschutz	F	18,0	OSB	G	240,0	Konstruktionsholz (80/ ...; e=300)	H	100,0	Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]	I	-	Rieselschutz	J	60,0	Direktabhängler entkoppelt mit CD-Profil (a=400)	K	25,0	Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>33 (3; 18)</td> <td>86 (-8; -16)</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;"> Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 24$ Hz $f_{02,Ber} = 65$ Hz </td> </tr> </tbody> </table>	33 (3; 18)	86 (-8; -16)	Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 24$ Hz $f_{02,Ber} = 65$ Hz	
	Dicke	Baustoff																																									
A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²																																									
B	-	Trennschicht Kunststoff																																									
C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]																																									
D	60,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 90 kg/m ²)																																									
E	-	Rieselschutz																																									
F	18,0	OSB																																									
G	240,0	Konstruktionsholz (80/ ...; e=300)																																									
H	100,0	Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]																																									
I	-	Rieselschutz																																									
J	60,0	Direktabhängler entkoppelt mit CD-Profil (a=400)																																									
K	25,0	Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm																																									
33 (3; 18)	86 (-8; -16)																																										
Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 24$ Hz $f_{02,Ber} = 65$ Hz																																											

Zeile	Trenndecken - Holzbalkendecken			$L_{n,w}$ (C_1 ; $C_{150-2500}$) in dB	R_w (C ; C_{tr}) in dB																								
3.1	 <p>dataholz-ID gdrnxa11b-02/03</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dicke</th> <th>Baustoff</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>60,0 Zementestrich 150 kg/m²</td></tr> <tr><td>B</td><td>- Trennschicht Kunststoff</td></tr> <tr><td>C</td><td>30,0 Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m³]</td></tr> <tr><td>D</td><td>- keine Schüttung</td></tr> <tr><td>E</td><td>- Rieselschutz</td></tr> <tr><td>F</td><td>18,0 OSB</td></tr> <tr><td>G</td><td>240,0 Konstruktionsholz (80/ ..; e=300)</td></tr> <tr><td>H</td><td>100,0 Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]</td></tr> <tr><td>I</td><td>- Rieselschutz</td></tr> <tr><td>J</td><td>60,0 Direktabhängler entkoppelt mit CD-Profil (a=400)</td></tr> <tr><td>K</td><td>25,0 Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm</td></tr> </tbody> </table>	Dicke	Baustoff	A	60,0 Zementestrich 150 kg/m ²	B	- Trennschicht Kunststoff	C	30,0 Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]	D	- keine Schüttung	E	- Rieselschutz	F	18,0 OSB	G	240,0 Konstruktionsholz (80/ ..; e=300)	H	100,0 Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]	I	- Rieselschutz	J	60,0 Direktabhängler entkoppelt mit CD-Profil (a=400)	K	25,0 Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm	39 (4; 14)	80 (-7; -16)
Dicke	Baustoff																												
A	60,0 Zementestrich 150 kg/m ²																												
B	- Trennschicht Kunststoff																												
C	30,0 Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]																												
D	- keine Schüttung																												
E	- Rieselschutz																												
F	18,0 OSB																												
G	240,0 Konstruktionsholz (80/ ..; e=300)																												
H	100,0 Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]																												
I	- Rieselschutz																												
J	60,0 Direktabhängler entkoppelt mit CD-Profil (a=400)																												
K	25,0 Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm																												
Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 24$ Hz $f_{02,Ber} = 161$ Hz																													
3.2	 <p>dataholz-ID gdrnxa11b-02/03</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Dicke</th> <th>Baustoff</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>A</td><td>60,0 Zementestrich 150 kg/m²</td></tr> <tr><td>B</td><td>- Trennschicht Kunststoff</td></tr> <tr><td>C</td><td>30,0 Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m³]</td></tr> <tr><td>D</td><td>- keine Schüttung</td></tr> <tr><td>E</td><td>- Rieselschutz</td></tr> <tr><td>F</td><td>18,0 OSB</td></tr> <tr><td>G</td><td>240,0 Konstruktionsholz (80/ ..; e=625)</td></tr> <tr><td>H</td><td>100,0 Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]</td></tr> <tr><td>I</td><td>- Rieselschutz</td></tr> <tr><td>J</td><td>60,0 Direktabhängler entkoppelt mit CD-Profil (a=400)</td></tr> <tr><td>K</td><td>25,0 Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm</td></tr> </tbody> </table>	Dicke	Baustoff	A	60,0 Zementestrich 150 kg/m ²	B	- Trennschicht Kunststoff	C	30,0 Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]	D	- keine Schüttung	E	- Rieselschutz	F	18,0 OSB	G	240,0 Konstruktionsholz (80/ ..; e=625)	H	100,0 Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]	I	- Rieselschutz	J	60,0 Direktabhängler entkoppelt mit CD-Profil (a=400)	K	25,0 Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm	43 (1; 9)	78 (-5; -13)
Dicke	Baustoff																												
A	60,0 Zementestrich 150 kg/m ²																												
B	- Trennschicht Kunststoff																												
C	30,0 Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]																												
D	- keine Schüttung																												
E	- Rieselschutz																												
F	18,0 OSB																												
G	240,0 Konstruktionsholz (80/ ..; e=625)																												
H	100,0 Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]																												
I	- Rieselschutz																												
J	60,0 Direktabhängler entkoppelt mit CD-Profil (a=400)																												
K	25,0 Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm																												
Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 24$ Hz $f_{02,Ber} = 161$ Hz																													

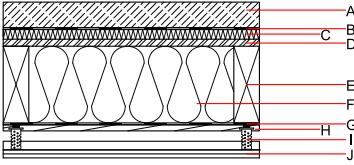
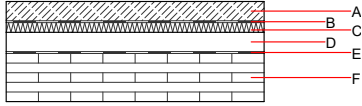
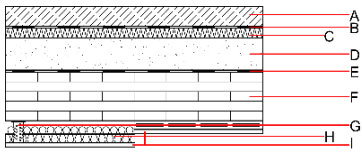
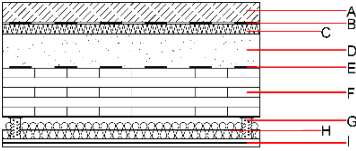
Zeile	Trenndecken - Holzbalkendecken	$L_{n,w}$ (C_i ; $C_{150-2500}$) in dB	R_w (C ; C_{tr}) in dB																			
4.1	 <p>[S.W.A.] DE 3.4</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Dicke</th> <th>Baustoff</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>80,0</td> <td>Zementestrich 190 kg/m²</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>-</td> <td>Trennschicht Kunststoff</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>30,0</td> <td>Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m³]</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>22,0</td> <td>OSB</td> </tr> </tbody> </table>		Dicke	Baustoff	A	80,0	Zementestrich 190 kg/m ²	B	-	Trennschicht Kunststoff	C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]	D	22,0	OSB	37 (1; 8)	81 (-3; -10)			
	Dicke	Baustoff																				
A	80,0	Zementestrich 190 kg/m ²																				
B	-	Trennschicht Kunststoff																				
C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]																				
D	22,0	OSB																				
		<p>Resonanzfrequenz (berechnet)</p> <p>$f_{01,Ber} = 24 \text{ Hz}$</p> <p>$f_{02,Ber} = 146 \text{ Hz}$</p>																				
		<table border="1"> <tbody> <tr> <td>E</td> <td>240,0</td> <td>Konstruktionsholz (80/ ...; e=300)</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>240,0</td> <td>Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>30,0</td> <td>Sparschalung</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>60,0</td> <td>Direktabhängiger entkoppelt mit CD-Profil (a=400)</td> </tr> <tr> <td>J</td> <td>25,0</td> <td>Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm</td> </tr> </tbody> </table>	E	240,0	Konstruktionsholz (80/ ...; e=300)	F	240,0	Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]	G	-	Rieselschutz	H	30,0	Sparschalung	I	60,0	Direktabhängiger entkoppelt mit CD-Profil (a=400)	J	25,0	Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm		
E	240,0	Konstruktionsholz (80/ ...; e=300)																				
F	240,0	Mineralwolle [038; ≥30; ≥1000°C]																				
G	-	Rieselschutz																				
H	30,0	Sparschalung																				
I	60,0	Direktabhängiger entkoppelt mit CD-Profil (a=400)																				
J	25,0	Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm																				

Tabelle 44: Bewertete Schalldämm-Maße R_w und Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ von Trenndecken in Holzmassivbauweise

Zeile	Trenndecken - Holzmassivdecken			$L_{n,w}$ (C_1 ; $C_{150-2500}$) in dB	R_w (C ; C_{tr}) in dB	
1.1	 <p>dataholz-ID gdmnxn02-05</p>		Dicke	Baustoff	D: 80 mm	
		A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²		k.A.
		B	-	Trennschicht Kunststoff	Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 55$ Hz	
		C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]		
		D	80,0	Splittschüttung (m' ca. 120 kg/m ²)		
		D	100,0	Splittschüttung (m' ca. 150 kg/m ²)	D: 100 mm	
		D	120,0	Splittschüttung (m' ca. 180 kg/m ²)		k.A.
		E	-	Rieselschutz	Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 53$ Hz	
		F	160,0	Brettsper Holz (verklebt) 5-lagig, Decklage mind. 40mm		
						D: 120 mm
				k.A.	k.A.	
				Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 52$ Hz		
2.1	 <p>dataholz-ID gdmnxa03a-01</p>		Dicke	Baustoff	43 (2; 6)	80 (-5; -12)
		A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²		
		B	-	Trennschicht Kunststoff	Resonanzfrequenz (berechnet) $f_{01,Ber} = 52$ Hz $f_{02,Ber} = 75$ Hz	
		C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]		
		D	100,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 150 kg/m ²)		
		E	-	Rieselschutz		
		F	160,0	Brettsper Holz (verklebt) 5-lagig, Decklage mind. 40mm		
		G	60,0	Direktabhängiger mit CD-Profil (a=400)		
		H	50,0	Mineralwolle [040; ≥16; <1000°C]		
		I	12,5	Gipsplatte Typ DF (GKF) oder Gipsfaserplatte		

Zeile	Trenndecken - Holzmassivdecken	$L_{n,w}$ (C_i ; $C_{150-2500}$) in dB	R_w (C ; C_{tr}) in dB																														
2.2	 <p>dataholz-ID gdmnxa03b-00</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Dicke</th> <th>Baustoff</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>60,0</td> <td>Zementestrich 150 kg/m²</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>-</td> <td>Trennschicht Kunststoff</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>30,0</td> <td>Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m³]</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>100,0</td> <td>Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 150 kg/m²)</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>-</td> <td>Rieselschutz</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>160,0</td> <td>Brettsper Holz (verklebt) 5-lagig, Decklage mind. 40mm</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>60,0</td> <td>Direktabhängler mit CD-Profil (a=400)</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>50,0</td> <td>Mineralwolle [040; ≥16; <1000°C]</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>25,0</td> <td>Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm</td> </tr> </tbody> </table>		Dicke	Baustoff	A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²	B	-	Trennschicht Kunststoff	C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]	D	100,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 150 kg/m ²)	E	-	Rieselschutz	F	160,0	Brettsper Holz (verklebt) 5-lagig, Decklage mind. 40mm	G	60,0	Direktabhängler mit CD-Profil (a=400)	H	50,0	Mineralwolle [040; ≥16; <1000°C]	I	25,0	Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm	<p>38 (3; 13)</p> <p>84 (-6; -14)</p>
	Dicke	Baustoff																															
A	60,0	Zementestrich 150 kg/m ²																															
B	-	Trennschicht Kunststoff																															
C	30,0	Trittschalldämmung MW-T [s'=10MN/m ³]																															
D	100,0	Splittschüttung elastisch (PUR) gebunden (m' ca. 150 kg/m ²)																															
E	-	Rieselschutz																															
F	160,0	Brettsper Holz (verklebt) 5-lagig, Decklage mind. 40mm																															
G	60,0	Direktabhängler mit CD-Profil (a=400)																															
H	50,0	Mineralwolle [040; ≥16; <1000°C]																															
I	25,0	Gipsplatte Typ DF (GKF) 2x12,5mm oder Gipsfaserplatte 2x12,5mm																															
		<p>Resonanzfrequenz (berechnet)</p> <p>$f_{01,Ber} = 49$ Hz</p> <p>$f_{02,Ber} = 58$ Hz</p>																															

Anhang 4: Prognose Trittschalldämmung in situ

Für die Prognose der In Situ Trittschallpegel wird das differenzierte Verfahren, beschrieben in (Rabold et al. 2020) und (Blödt 2020) angewandt. Kennwerte für die Korrektursummanden $K1$, die Trittschallübertragung über DFf ($L_{n,DFf,lab,w}$), Verbesserungsmaßnahmen über flankierende Wände ($\Delta R_{j,w}$, $\Delta R_{ij,w}$) sind in (Blödt 2020) zusammengefasst zu finden. Die bewerteten Norm-Trittschallpegel der Trennbauteile (Geschossdecken) $L_{n,d,w}$ wurden basierend auf ähnlichen Aufbauten in Datenbanken (interne Messungen; www.dataholz.eu; DIN 4109-33) abgeschätzt.

Folgend werden die notwendigen Formeln zur Prognose der Trittschallübertragung nach dem gewählten Verfahren dargestellt. Zur Berechnung wurden jeweils alle unterschiedlichen Flanken eines Raumes gesondert berücksichtigt und abschließend energetisch addiert. Ein anschauliches Beispiel zum Vorgehen ist im Anhang in (Blödt 2020) zu finden.

Berechnung des bew. Norm-Trittschallpegels über den Flankenweg Df basierend auf dem Norm-Trittschallpegel des Trennbauteils (= Geschossdecke) und des Korrektursummanden $K1$:

$$L_{n,Df,lab,w} = 10 \log \left(10^{\left(\frac{L_{n,d,w}+K1}{10}\right)} - 10^{\left(\frac{L_{n,d,w}}{10}\right)} \right) \quad \text{Formel 5}$$

Umrechnung des bew. Norm-Trittschallpegels über den Flankenweg Df in die zu prognostizierende Flankensituation unter Berücksichtigung der Verbesserung der empfangsraumseitigen Flanke $\Delta R_{j,w}$, der Verbesserung der Stoßstellendämmung (z.B. durch elastische Lager) ΔK_{ij} und der Trennbauteilfläche S_i und Kopplungslänge l_{ij} :

$$L_{n,Df,w} = L_{n,Df,lab,w} - \Delta R_{j,w} - \Delta K_{ij} - 10 \log \left(\frac{S_i}{l_0 l_{ij}} \right) \quad \text{Formel 6}$$

Umrechnung des bew. Norm-Trittschallpegels über den Flankenweg DFf in die zu prognostizierende Flankensituation unter Berücksichtigung der Verbesserung der Flankenwände $\Delta R_{ij,w}$, der Verbesserung der Stoßstellendämmung (z.B. durch elastische Lager) ΔK_{ij} und der Trennbauteilfläche S_i und Kopplungslänge l_{ij} :

$$L_{n,DFf,w} = L_{n,DFf,lab,w} - \Delta R_{ij,w} - \Delta K_{ij} - 10 \log \left(\frac{S_i}{l_0 l_{ij}} \right) \quad \text{Formel 7}$$

Energetische Addition der Übertragungen über die Flankenwege Df und DFf. Abschließend werden die Flankenübertragung $L_{n,ij,w}$ mit dem bew. Norm-Trittschallpegel des Trennbauteils $L_{n,d,w}$ ebenfalls energetisch miteinander addiert, um die Trittschallübertragung in der Bausituation zu erhalten:

$$L_{n,ij,w} = 10 \log \left(10^{\left(\frac{L_{n,Df,w}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{n,DFf,w}}{10}\right)} \right) \quad \text{Formel 8}$$

In folgenden Tabellen sind die jeweiligen Kennwerte für die jeweilige Prognosesituation abgebildet. Dabei wird auch zwischen den unterschiedlichen flankierenden Situationen unterschieden. Für einen Raum ergibt das maximal 4 unterschiedliche Flanken, die wiederum durch 4 Spalten repräsentiert werden. Neben dem bewerteten Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ wird auch der bewertete Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ angeführt. Dieser basiert auf dem Norm-Trittschallpegel, wobei um das Raumvolumen und unter der Annahme, dass eine Nachhallzeit von 0,5 s vorliegt, korrigiert wurde.

Tabelle 45: Kennwerte zur Prognostizierung des In Situ Trittschallpegels von In-Situ 1 | M1.

In-Situ 1 M1: kleiner Raum				
bew. Norm-Trittschallpegel der Geschossdecke $L_{n,d,w}$ in dB	37			
Trennbauteilfläche/Abstrahlfläche S_i in m ²	12,3			
Empfangsraumvolumen V in m ³	30,8			
Flankenlängen l_{ij} in m	8,7	5,7	--	--
Korrektursummand für den Deckenkopf K_1 in dB	3	4	--	--
bew. Norm-Trittschallp. über Dff im Labor $L_{n,Dff,lab,w}$ in dB	40	40	--	--
Verbesserung der Flanke im Empfangsraum $\Delta R_{j,w}$ in dB	--	4	--	--
Verbesserung an beiden Flankenwänden $\Delta R_{ij,w}$ in dB	--	6	--	--
Verbesserung der Stoßstellendämmung ΔK_{ij} in dB	--	--	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Df $L_{n,Df,w}$ in dB	35,5	31,4	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Dff $L_{n,Dff,w}$ in dB	38,5	30,6	--	--
bew. Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ in dB	42,6			
bew. Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ in dB (angenommene Nachhallzeit: 0,5 s)	42,7			

Tabelle 46: Kennwerte zur Prognostizierung des In Situ Trittschallpegels von In-Situ 2 | M4.

In-Situ 2 M4: kleiner Raum				
bew. Norm-Trittschallpegel der Geschossdecke $L_{n,d,w}$ in dB	47			
Trennbauteilfläche/Abstrahlfläche S_i in m ²	11,6			
Empfangsraumvolumen V in m ³	30,5			
Flankenlängen l_{ij} in m	6,9	2,9	4,0	--
Korrektursummand für den Deckenkopf K_1 in dB	1	1	1	--
bew. Norm-Trittschallp. über Dff im Labor $L_{n,Dff,lab,w}$ in dB	40	40	40	--
Verbesserung der Flanke im Empfangsraum $\Delta R_{j,w}$ in dB	5	5	5	--
Verbesserung an beiden Flankenwänden $\Delta R_{ij,w}$ in dB	7,5	7,5	7,5	--
Verbesserung der Stoßstellendämmung ΔK_{ij} in dB	2	2	2	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Df $L_{n,Df,w}$ in dB	33,9	30,1	31,5	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Dff $L_{n,Dff,w}$ in dB	28,2	24,5	25,9	--
bew. Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ in dB	47,5			
bew. Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ in dB (angenommene Nachhallzeit: 0,5 s)	47,6			

Tabelle 47: Kennwerte zur Prognostizierung des In Situ Trittschallpegels von In-Situ 3 | M5.

In-Situ 3 M5: kleiner Raum				
bew. Norm-Trittschallpegel der Geschossdecke $L_{n,d,w}$ in dB	29			
Trennbauteilfläche/Abstrahlfläche S_i in m ²	13,5			
Empfangsraumvolumen V in m ³	32,8			
Flankenlängen l_{ij} in m	4,1	3,3	4,1	3,3
Korrektursummand für den Deckenkopf K_1 in dB	3	4	4	3
bew. Norm-Trittschallp. über Dff im Labor $L_{n,Dff,lab,w}$ in dB	40	40	40	40
Verbesserung der Flanke im Empfangsraum $\Delta R_{j,w}$ in dB	--	2	2	--
Verbesserung an beiden Flankenwänden $\Delta R_{ij,w}$ in dB	--	3	3	--
Verbesserung der Stoßstellendämmung ΔK_{ij} in dB	--	--	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Df $L_{n,Df,w}$ in dB	23,7	22,7	23,6	22,9
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Dff $L_{n,Dff,w}$ in dB	34,8	30,9	31,8	33,9
bew. Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ in dB	39,6			
bew. Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ in dB (angenommene Nachhallzeit: 0,5 s)	39,4			

Tabelle 48: Kennwerte zur Prognostizierung des In Situ Trittschallpegels von In-Situ 4 | M6.

In-Situ 4 M6: kleiner Raum				
bew. Norm-Trittschallpegel der Geschosdecke $L_{n,d,w}$ in dB	44			
Trennbauteilfläche/Abstrahlfläche S_i in m ²	14,3			
Empfangsraumvolumen V in m ³	39,9			
Flankenlängen l_{ij} in m	4,9	5,1	2,8	3,0
Korrektursummand für den Deckenkopf K_1 in dB	1	1	1	1
bew. Norm-Trittschallp. über Dff im Labor $L_{n,Dff,lab,w}$ in dB	40	40	40	40
Verbesserung der Flanke im Empfangsraum $\Delta R_{j,w}$ in dB	--	5	5	2
Verbesserung an beiden Flankenwänden $\Delta R_{ij,w}$ in dB	--	7,5	7,5	3
Verbesserung der Stoßstellendämmung ΔK_{ij} in dB	--	--	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Df $L_{n,Df,w}$ in dB	33,5	28,6	26,1	29,5
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Dff $L_{n,Dff,w}$ in dB	35,3	28,0	25,5	30,3
bew. Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ in dB	45,2			
bew. Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ in dB (angenommene Nachhallzeit: 0,5 s)	44,1			

Tabelle 49: Kennwerte zur Prognostizierung des In Situ Trittschallpegels von In-Situ 5 | M8.

In-Situ 5 M8: kleiner Raum				
bew. Norm-Trittschallpegel der Geschosdecke $L_{n,d,w}$ in dB	35			
Trennbauteilfläche/Abstrahlfläche S_i in m ²	13,3			
Empfangsraumvolumen V in m ³	34,2			
Flankenlängen l_{ij} in m	2,7	12,4	--	--
Korrektursummand für den Deckenkopf K_1 in dB	6	7	--	--
bew. Norm-Trittschallp. über Dff im Labor $L_{n,Dff,lab,w}$ in dB	40	40	--	--
Verbesserung der Flanke im Empfangsraum $\Delta R_{j,w}$ in dB	--	--	--	--
Verbesserung an beiden Flankenwänden $\Delta R_{ij,w}$ in dB	--	--	--	--
Verbesserung der Stoßstellendämmung ΔK_{ij} in dB	--	--	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Df $L_{n,Df,w}$ in dB	32,9	40,8	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Dff $L_{n,Dff,w}$ in dB	33,1	39,7	--	--
bew. Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ in dB	44,5			
bew. Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ in dB (angenommene Nachhallzeit: 0,5 s)	44,1			

Tabelle 50: Kennwerte zur Prognostizierung des In Situ Trittschallpegels von In-Situ 5 | M9.

In-Situ 5 M9: großer Raum				
bew. Norm-Trittschallpegel der Geschossdecke $L_{n,d,w}$ in dB	35			
Trennbauteilfläche/Abstrahlfläche S_i in m ²	23,7			
Empfangsraumvolumen V in m ³	61,0			
Flankenlängen l_{ij} in m	3,9	18,2	--	--
Korrektursummand für den Deckenkopf K_1 in dB	6	7	--	--
bew. Norm-Trittschallp. über Dff im Labor $L_{n,DFf,lab,w}$ in dB	40	40	--	--
Verbesserung der Flanke im Empfangsraum $\Delta R_{j,w}$ in dB	--	--	--	--
Verbesserung an beiden Flankenwänden $\Delta R_{ij,w}$ in dB	--	--	--	--
Verbesserung der Stoßstellendämmung ΔK_{ij} in dB	--	--	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Df $L_{n,Df,w}$ in dB	31,8	39,9	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Dff $L_{n,DFf,w}$ in dB	32,1	38,8	--	--
bew. Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ in dB	43,7			
bew. Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ in dB (angenommene Nachhallzeit: 0,5 s)	40,8			

Tabelle 51: Kennwerte zur Prognostizierung des In Situ Trittschallpegels von In-Situ 6 | M10.

In-Situ 6 M10: kleiner Raum				
bew. Norm-Trittschallpegel der Geschossdecke $L_{n,d,w}$ in dB	55			
Trennbauteilfläche/Abstrahlfläche S_i in m ²	12,0			
Empfangsraumvolumen V in m ³	30,5			
Flankenlängen l_{ij} in m	7,0	7,0	--	--
Korrektursummand für den Deckenkopf K_1 in dB	1	1	--	--
bew. Norm-Trittschallp. über Dff im Labor $L_{n,DFf,lab,w}$ in dB	40	40	--	--
Verbesserung der Flanke im Empfangsraum $\Delta R_{j,w}$ in dB	--	--	--	--
Verbesserung an beiden Flankenwänden $\Delta R_{ij,w}$ in dB	--	--	--	--
Verbesserung der Stoßstellendämmung ΔK_{ij} in dB	--	--	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Df $L_{n,Df,w}$ in dB	46,8	46,8	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Dff $L_{n,DFf,w}$ in dB	37,6	37,6	--	--
bew. Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ in dB	56,3			
bew. Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ in dB (angenommene Nachhallzeit: 0,5 s)	56,4			

Tabelle 52: Kennwerte zur Prognostizierung des In Situ Trittschallpegels von In situ 7.

In situ 7				
bew. Norm-Trittschallpegel der Geschosdecke $L_{n,d,w}$ in dB	45			
Trennbauteilfläche/Abstrahlfläche S_i in m ²	13,7			
Empfangsraumvolumen V in m ³	34,5			
Flankenlängen l_{ij} in m	2,9	5,3	4,8	2,3
Korrektursummand für den Deckenkopf K_1 in dB	4	3	3	3
bew. Norm-Trittschallp. über Dff im Labor $L_{n,Dff,lab,w}$ in dB	40	40	40	40
Verbesserung der Flanke im Empfangsraum $\Delta R_{j,w}$ in dB	3	--	5	--
Verbesserung an beiden Flankenwänden $\Delta R_{ij,w}$ in dB	4,5	--	7,5	--
Verbesserung der Stoßstellendämmung ΔK_{ij} in dB	--	--	--	--
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Df $L_{n,Df,w}$ in dB	37,0	40,9	35,4	37,2
bew. Norm-Flankentrittschallpegel über Dff $L_{n,Dff,w}$ in dB	28,7	35,9	27,9	32,2
bew. Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ in dB	48,1			
bew. Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$ in dB (angenommene Nachhallzeit: 0,5 s)	47,7			