



---

# **Abschlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben „VibWood“**

**Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung  
von Holzdecken und zur Bewertung und Dimensionierung von  
angepassten Schwingungsschutzsystemen**

Mathias Kohrmann, M.Sc.      Dipl.-Ing.(FH) Raphael Vörtl  
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Müller      Prof. Dr. Ulrich Schanda  
Dr.-Ing. Martin Buchschmid

April 2014



Das IGF-vorhaben 16758/N der Forschungsvereinigung iVTH wurde über die AIF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Des Weiteren wurde die Durchführung des Projektes durch folgende Firmen in Form von Sach- und Dienstleistungen unterstützt:

- Getzner Werkstoffe GmbH
- Knauf Gips KG
- Lignotrend Produktions GmbH
- Merk Timber GmbH
- Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH
- Regnauer Fertigbau GmbH & Co. KG
- Vogl Deckensysteme GmbH

Besonderer Dank für ihre Diskussionsbeiträge und Informationen gilt folgenden Personen:

- Andreas Amorth, Merk Timber GmbH
- Dr.-Ing. Dejan Arsic, Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH
- Ralph Eckert, Lignotrend Produktiones GmbH
- Prof. Dr.-Ing. Patricia Hamm, Hochschule Biberach
- Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger, Technische Universität München
- Markus Leppin, Regnauer Fertigungsbau GmbH & Co. KG
- Dr.-Ing. Bernhard Mohr, Dr. Schütz Ingenieure GmbH
- Hendrik Reichelt, Getzner Werkstoffe GmbH
- Benedikt Roos, Vogl Deckensysteme GmbH
- Jochen Seidel, Knauf Gips KG
- Erich Vogl, Vogl Deckensysteme GmbH
- Dr. Armin Winkler, Gerb Schwingungsisolierungen GmbH & Co. KG



# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                              | <b>9</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                                | <b>17</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                              | <b>21</b> |
| <b>1 Zusammenfassung</b>                                  | <b>23</b> |
| 1.1 Motivation . . . . .                                  | 23        |
| 1.2 Vorhaben . . . . .                                    | 23        |
| <b>2 Beschreibung der zu untersuchenden Deckensysteme</b> | <b>29</b> |
| 2.1 Auswahl von Tragsystemen . . . . .                    | 29        |
| 2.1.1 Brettsperrholzdecke . . . . .                       | 30        |
| 2.1.2 Holzbalkendecke . . . . .                           | 33        |
| 2.1.3 Hohlkastenträgerdecke . . . . .                     | 34        |
| 2.2 Deckenaufbauten . . . . .                             | 39        |
| 2.2.1 Abgehängte Unterdecke . . . . .                     | 39        |
| 2.2.2 Schwimmender Estrich . . . . .                      | 39        |
| <b>3 Experimentelle Untersuchungen</b>                    | <b>47</b> |
| 3.1 Beschreibung des Deckenprüfstandes . . . . .          | 47        |
| 3.2 Messtechnik . . . . .                                 | 48        |
| 3.2.1 Datenaufnahme . . . . .                             | 48        |
| 3.2.2 Sensoren . . . . .                                  | 51        |
| 3.2.3 Modalhammer . . . . .                               | 53        |
| 3.2.4 Schwingerreger . . . . .                            | 54        |
| 3.2.5 Schallintensitätsmesssonde . . . . .                | 55        |
| 3.3 Auswertung . . . . .                                  | 57        |
| 3.3.1 Übertragungsfunktionen . . . . .                    | 58        |
| 3.3.2 Betriebsschwinganalyse . . . . .                    | 60        |
| 3.4 Anregung mit Schwingerreger . . . . .                 | 62        |
| 3.4.1 Anregungssignale . . . . .                          | 63        |
| 3.4.2 Aufhängung . . . . .                                | 70        |
| 3.5 Anregung mit Modalhammer . . . . .                    | 74        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.6      | Auflagerung der Deckenkonstruktionen                                       | 76         |
| 3.6.1    | Auflagerung direkt auf Stahlwinkeln  | 76         |
| 3.6.2    | Gelenkige Auflagerung auf Stahlrohr mit Verschraubung von oben             | 79         |
| 3.6.3    | Messung der Auflagerimpedanzen an den Stahlwinkeln                         | 81         |
| 3.6.4    | Auflagerung auf Elastomer mit linienförmiger Einspannung                   | 81         |
| 3.7      | Messung der abgestrahlten Schalleistung                                    | 91         |
| 3.7.1    | Berechnung der Schallintensität  | 91         |
| 3.7.2    | Durchführung der Intensitätsmessung  | 92         |
| 3.8      | Resultierende Messvorschriften   | 93         |
| <b>4</b> | <b>Durchgeführte Messungen</b>   | <b>97</b>  |
| 4.1      | Messungen an Massivholzdecken  | 100        |
| 4.1.1    | Einzelelemente   | 101        |
| 4.1.2    | Rohdecke   | 110        |
| 4.1.3    | Rohdecke mit Unterdecke  | 133        |
| 4.1.4    | Rohdecke mit schwimmenden Estrichaufbauten                                 | 149        |
| 4.1.5    | Rohdecke mit Unterdecke und Estrich  | 159        |
| 4.1.6    | Vergleich der Abstrahlgrade der Unterdecke bei unterschiedlichen Aufbauten | 182        |
| 4.1.7    | Übersicht Dämpfungen der Leno162 Deckenkonstruktionen                      | 184        |
| 4.2      | Messungen an Holzbalkendecke   | 185        |
| 4.2.1    | Einzelbalken   | 185        |
| 4.2.2    | Rohdecke   | 188        |
| 4.2.3    | Rohdecke mit Unterdecke  | 193        |
| 4.2.4    | Rohdecke mit Trockenestrich und Unterdecke                                 | 203        |
| 4.2.5    | Rohdecke mit Trockenestrich, Unterdecke und Schüttung                      | 211        |
| 4.2.6    | Vergleich der Holzbalkendecke mit unterschiedlichen Aufbauten              | 218        |
| 4.2.7    | Vergleich von Holzbalkendecke und Brettsper Holzdecke mit Trockenestrich   | 220        |
| 4.3      | Messungen an Hohlkastenträgerdecke   | 222        |
| 4.3.1    | Einzelelemente   | 222        |
| 4.3.2    | Rohdecke   | 226        |
| 4.3.3    | Doppelement  | 232        |
| 4.3.4    | Doppelement mit Schüttung  | 237        |
| 4.3.5    | Vergleich des Doppelementes mit und ohne Schüttung                         | 243        |
| 4.4      | Vergleich der Dämpfungen der untersuchten Deckenkonstruktionen             | 247        |
| <b>5</b> | <b>Schwingungstilger</b>   | <b>249</b> |
| 5.1      | Grundlagen [25]  | 249        |
| 5.2      | Konstruktion der Tilger [25]   | 253        |
| 5.2.1    | Feder-Dämpfer-Elemente   | 253        |
| 5.2.2    | Masse  | 254        |
| 5.2.3    | Auslegung der Tilger   | 254        |
| 5.3      | Messtechnische Untersuchung der Tilger                                     | 256        |
| 5.3.1    | Tilgerprüfstand  | 256        |



|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.3.2    | Vergleich Messung vs. Auslegung   | 256        |
| 5.3.3    | Einfluss von störenden Gegenständen auf der Standfläche                                       | 257        |
| 5.3.4    | Amplitudenabhängigkeit des Sylomers   | 260        |
| 5.3.5    | Dauerstandfestigkeit Sylomer  | 261        |
| 5.4      | Tilger auf Brettsperrholz-Rohdecke  | 261        |
| 5.4.1    | Tilger auf vierseitig aufgelagerter Rohdecke  | 262        |
| 5.4.2    | Tilger auf Brettsperrholz-Decke mit Unterdecke  | 264        |
| 5.4.3    | Wirkung von Tilgern bei zusätzlicher Masse auf Decke  | 269        |
| 5.4.4    | Reduzierung der Tilgeranzahl  | 272        |
| 5.4.5    | Zusammenfassung   | 274        |
| 5.5      | Tilger auf Unterdecke   | 274        |
| 5.5.1    | Tilger 01   | 274        |
| 5.5.2    | Tilger 02   | 280        |
| <b>6</b> | <b>Theoretische Grundlagen</b>  | <b>285</b> |
| 6.1      | Holz als anisotroper, elastischer Festkörper [23]   | 285        |
| 6.2      | Schallabstrahlung von endlichen Platten [60]  | 292        |
| 6.2.1    | Schallleistung und Schallintensität   | 292        |
| 6.2.2    | Ermittlung der von einer als ebener Strahler abgebildeten Platte abgestrahlten Schallleistung | 294        |
| 6.2.3    | Abstrahlverhalten einer unendlichen ausgedehnten Platte                                       | 297        |
| 6.2.4    | Übergang zur endlichen Platte   | 298        |
| 6.2.5    | Abstrahlgrad und Abstrahlmaß  | 299        |
| 6.3      | Modalanalyse [60]   | 301        |
| 6.4      | Dimensionsanalyse [48]  | 304        |
| 6.4.1    | Gewinnung dimensionsloser Kennzahlen aus Relevanzlisten                                       | 305        |
| 6.4.2    | Das $\pi$ -Theorem von Buckingham   | 306        |
| <b>7</b> | <b>Entwicklung der numerischen Modelle</b>  | <b>313</b> |
| 7.1      | Beschreibung der Analyse  | 313        |
| 7.1.1    | Prozessschritte der Simulationen  | 314        |
| 7.1.2    | Modularer Aufbau  | 317        |
| 7.1.3    | Parametrisierung  | 318        |
| 7.2      | Strukturmodelle   | 319        |
| 7.2.1    | Gemeinsamkeiten aller angesetzten Modelle   | 320        |
| 7.2.2    | Brettsperrholzdecke   | 321        |
| 7.2.3    | Holzbalkendecke   | 327        |
| 7.2.4    | Hohlkastendecke   | 333        |
| 7.2.5    | Estrich   | 334        |
| 7.2.6    | Abgehängte Decke  | 336        |
| 7.2.7    | Auflagerbedingungen   | 342        |
| 7.3      | Dynamische Analysen   | 347        |
| 7.3.1    | Modalanalyse  | 348        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 7.3.2    | Harmonische Analyse . . . . .  | 349        |
| 7.3.3    | Transiente dynamische Analyse (gehende Person) . . . . .                             | 355        |
| 7.4      | Auswertemodelle in MATLAB® . . . . .   | 358        |
| 7.4.1    | Modell zur Ermittlung der abgestrahlten Schallleistung . . . . .                     | 359        |
| 7.4.2    | Bestimmung von KB-Werten . . . . .   | 369        |
| <b>8</b> | <b>Validierung und Kalibrierung der numerischen Modelle</b>                          | <b>373</b> |
| 8.1      | Validierung des Modells zur Abstrahlung . . . . .                                    | 373        |
| 8.1.1    | Messaufbau . . . . .   | 373        |
| 8.1.2    | Vergleich der Messergebnisse . . . . .   | 376        |
| 8.1.3    | Auswertung im Wellenzahlbereich . . . . .  | 378        |
| 8.2      | Kalibrierung der Modelle der Haupttragsysteme . . . . .                              | 379        |
| 8.2.1    | Konvergenzstudie zur Diskretisierung . . . . .                                       | 379        |
| 8.2.2    | Kalibrierung der Brettsperrholzdecke durch „Model-Updating“ . . . . .                | 380        |
| 8.2.3    | Untersuchungen zur Modellierung der Holzbalkendecke . . . . .                        | 385        |
| 8.3      | Untersuchungen zur abgehängten Decke . . . . .                                       | 389        |
| 8.3.1    | Bestimmung der Materialparameter der Gipsfaserplatten im Wellenzahlbereich . . . . . | 389        |
| 8.3.2    | Messtechnische Untersuchung unterschiedlicher Abhänger . . . . .                     | 391        |
| 8.4      | Aspekte der Modellierung der Luft im Zwischenraum . . . . .                          | 392        |
| 8.4.1    | Validierung der Referenzmessung . . . . .  | 393        |
| 8.4.2    | Fallstudie zur Modellierung . . . . .  | 394        |
| 8.4.3    | Untersuchung im Wellenzahlbereich . . . . .  | 395        |
| 8.4.4    | Kalibrierung der Dämpfung und Abgleich mit Messergebnissen . . . . .                 | 398        |
| 8.5      | Grenzen der Anwendbarkeit . . . . .  | 399        |
| <b>9</b> | <b>Beschreibung der Simulationen und Ergebnisauswertung</b>                          | <b>407</b> |
| 9.1      | Parameterstudien . . . . .   | 407        |
| 9.1.1    | Ablauf und Programmierung in MATLAB® . . . . .                                       | 408        |
| 9.1.2    | Parameterauswahl . . . . .   | 410        |
| 9.1.3    | Durchgeführte Studien . . . . .  | 411        |
| 9.2      | Auswertung der Simulationsergebnisse . . . . .                                       | 417        |
| 9.2.1    | Dimensionslose Betrachtungen . . . . .   | 417        |
| 9.2.2    | Auswertung der Parameter der Unterdecke . . . . .                                    | 423        |
| 9.2.3    | Auswertung der HBD Parameter und der Ausbauzustände . . . . .                        | 427        |
| 9.2.4    | Zusammenfassung der Einflüsse der Parameter . . . . .                                | 429        |
| 9.3      | Grafische Benutzeroberfläche . . . . .   | 429        |
| 9.3.1    | Beschreibung der Oberfläche . . . . .  | 430        |
| 9.3.2    | Ablauf der Eingabe . . . . .   | 430        |
| <b>A</b> | <b>Simulationsergebnisse</b>   | <b>433</b> |
| A.1      | Eigenfrequenz-Nomogramme . . . . .   | 434        |



|       |  |     |
|-------|--|-----|
| A.2   | abgestrahlte Schalleistung . . . . .   | 445 |
| A.2.1 | Nomogramme . . . . .   | 445 |
| A.2.2 | Vergleich der Abhängehöhen . . . . .   | 449 |
| A.2.3 | Vergleich der Raster der Traglattung (mit und ohne Abhänger) . . . . .       | 453 |
| A.2.4 | Vergleich der Absortionsraten . . . . .                                      | 461 |
| A.2.5 | Vergleich der Längenverhältnisse (Einzelmessungen und Mittelwerte) . . . . . | 469 |
| A.2.6 | Vergleich unterschiedlicher Längen (Mittelwerte) . . . . .                   | 477 |
| A.2.7 | Vergleich mit und ohne Estrich (Mittelwerte) . . . . .                       | 481 |
| A.2.8 | Vergleich von Balkenabständen, Balkenbreiten und Ausbauzuständen . . . . .   | 485 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>Literaturverzeichnis</b> | <b>507</b> |
|-----------------------------|------------|



# Abbildungsverzeichnis

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Schichtaufbau der Brettsperrholz-Elemente aus Leno105                       | 31 |
| 2.2  | Verbindung der Stoßfugen der Brettsperrholz-Elemente mit Kerto®-Streifen    | 32 |
| 2.3  | Balkenlage der Holzbalkendecke im Deckenprüfstand                           | 33 |
| 2.4  | Zeichnung der Balkenlage und Beplankung der Holzbalkendecke                 | 35 |
| 2.5  | Beplankung der Holzbalkendecke  | 36 |
| 2.6  | Untersicht der Holzbalkendecke  | 36 |
| 2.7  | Stirnseite des Lignotrend-Hohlkastenelementes                               | 37 |
| 2.8  | Detailzeichnungen der Hohlkastendecke aus LIGNO Rippe Q3 169,               | 38 |
| 2.9  | Detailzeichnung der Abhängung der Unterdecke                                | 40 |
| 2.10 | Abhängung der Unterdecke  | 40 |
| 2.11 | Unterkonstruktion der Unterdecke  | 41 |
| 2.12 | Ausschnitt der Unterkonstruktion der Unterdecke                             | 41 |
| 2.13 | Zeichnung der Unterkonstruktion der Unterdecke an der Brettsperrholz-Decke  | 42 |
| 2.14 | Zeichnung der Unterkonstruktion der Unterdecke für die Holzbalken-Decke     | 43 |
| 2.15 | Fließestrich unmittelbar nach dem Einbringen                                | 44 |
| 2.16 | Fließestrich nach Trocknung mit Trittschalldämmung und Trennlage            | 45 |
| 2.17 | Prinzipskizze zur Verlegung des Trockenestrich                              | 46 |
| 2.18 | Trocken- und Fließestrich auf der Brettsperrholz-Decke                      | 46 |
| 3.1  | Deckenprüfstand des Labors für Schallmesstechnik LaSM, Erdgeschoss          | 48 |
| 3.2  | Grundrisse des Deckenprüfstandes  | 49 |
| 3.3  | Schnitt des Deckenaufagers  | 50 |
| 3.4  | Datenaufnahmesystem MBBM VAS MKII   | 51 |
| 3.5  | Beschleunigungsaufnehmer  | 52 |
| 3.6  | Kraftaufnehmer mit Vorverstärker  | 53 |
| 3.7  | Modalhämmer   | 53 |
| 3.8  | Schwingerreger als Inertial- und Modalerreger mit Sensorik zur Kraftmessung | 55 |
| 3.9  | Intensitätssonde  | 56 |
| 3.10 | Verfahrensystem für Intensitätsmessungen                                    | 56 |
| 3.11 | Empfangsraum, ausgekleidet mit Absorptionsmaterial                          | 57 |
| 3.12 | Beispiel für eine Übertragungsfunktion                                      | 60 |
| 3.13 | Beispiel für die Betriebschwinganalyse eines BSH-Elementes                  | 61 |
| 3.14 | Messpositionen am BSH-Element   | 62 |
| 3.15 | Vergleich der Frequenzspektren verschiedener Anregungssignale               | 64 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.16 Vergleich der Eingangsakzeleranz eines BSH-Elementes bei unterschiedlicher Anregung . . . . .   | 65  |
| 3.17 Eingangsakzeleranz eines BSH-Elements bei Anregung mit Stufen- und Gleitsinus   | 67  |
| 3.18 Zeitsignal und Frequenzspektrum eines Gleitsinus ohne und mit Glättung . . . . .  | 69  |
| 3.19 Aufhängung des Schwingerregers am Portalkran . . . . .  | 71  |
| 3.20 Eingangsakzeleranz eines BSH-Elementes bei Variation der Aufhängung des Schwingerregers . . . . .   | 72  |
| 3.21 Eingangsakzeleranz, Frequenzausschnitte . . . . .   | 73  |
| 3.22 Kraft-Zeit-Verlauf eines weichen/harten Hammerschlages und zugehöriges Frequenzspektrum . . . . .   | 75  |
| 3.23 Eingangsakzeleranz eines BSH-Elementes bei Anregung mit Hammer und Schwingerregger . . . . .  | 77  |
| 3.24 Eingangsakzeleranz eines BSH-Elementes mit und ohne Verspannung der Ecken   | 78  |
| 3.25 Skizze zur Auflagerung der Decke auf einem Rohr . . . . .   | 79  |
| 3.26 Eingangsakzeleranz eines BSH-Elementes bei unterschiedlicher Auflagerung . .  | 80  |
| 3.27 Eingangsimpedanzen der Auflagerwinkel des Deckenprüfstandes . . . . .   | 82  |
| 3.28 Skizze zur Auflagerung der Decke auf einem Elastomer . . . . .  | 84  |
| 3.29 Eingangsakzeleranz eines BSH-Elementes bei Variation des Elastomerauflagers .   | 85  |
| 3.30 Eingangsakzeleranz eines BSH-Elementes bei Variation des Elastomerauflagers im Frequenzbereich von $5\text{ Hz} - 25\text{ Hz}$ . . . . . | 86  |
| 3.31 Skizze zur Auflagerung auf einem Elastomer, endgültige Lösung . . . . .   | 87  |
| 3.32 Eingangsakzeleranz eines BSH-Elementes bei Variation der Auflagervorspannung  | 88  |
| 3.33 Eingangsakzeleranz eines BSH-Elementes und Transferakzeleranzen am Auflager   | 90  |
| 3.34 Frequenzspektren der Intensität, der Schnelle und des Abstrahlgrades einer Unterdecke . . . . .   | 94  |
|  |     |
| 4.1 Positionsskizze der Messpunkte der ganzen Decke . . . . .  | 98  |
| 4.2 Positionsskizze der Messpunkte der halben Decke . . . . .  | 98  |
| 4.3 Eingangsakzeleranzen Leno105 Einzelelemente . . . . .  | 101 |
| 4.4 Leno105, Einzelelemente, Maximalwerte der Amplituden . . . . .   | 105 |
| 4.5 Eingangsakzeleranzen Leno162 Einzelelemente . . . . .  | 106 |
| 4.6 Leno162, Einzelelemente, Maximalwerte der Amplituden der Eigenformen . . . .   | 109 |
| 4.7 Schnitt durch Rohdecke aus Leno-Brettsperrholz . . . . .   | 110 |
| 4.8 Eingangsakzeleranz BSH-Rohdecke Leno105 zweiseitig gelagert . . . . .  | 111 |
| 4.9 Leno105, Rohdecke, zweiseitig gespannt, Maxima der Schwingformen . . . . .   | 115 |
| 4.10 Eingangsakzeleranz Rohdecke Leno105 vierseitig gelagert . . . . .   | 116 |
| 4.11 Leno105, Rohdecke, vierseitig gelagert, Maxima der Eigenformen . . . . .  | 120 |
| 4.12 Eingangsakzeleranz RD Leno162, zweiseitig gelagert . . . . .  | 121 |
| 4.13 Schallabstrahlung der Leno162 BSH-Rohdecke . . . . .  | 122 |
| 4.14 Leno162, Rohdecke, zweiseitig gelagert, Maxima der Eigenformen . . . . .  | 128 |
| 4.15 Schnitt durch Leno162 Rohdecke . . . . .  | 129 |
| 4.16 Eingangsakzeleranz Rohdecke aus Leno162, vierseitig gelagert . . . . .  | 129 |
| 4.17 Leno162, Rohdecke, vierseitig gelagert, Maxima der Eigenformen . . . . .  | 132 |



|  |     |
|--|-----|
| 4.18 Schnitt durch Leno105 Rohdecke mit Unterdecke . . . . .                                 | 133 |
| 4.19 Eingangsakzeleranz Leno105 Rohdecke mit Unterdecke . . . . .                            | 134 |
| 4.20 Leno 105 Rohdecke mit Unterdecke, Schallabstrahlung . . . . .                           | 135 |
| 4.21 Leno105, Rohdecke mit Unterdecke, Maxima der Eigenformen . . . . .                      | 141 |
| 4.22 Schnitt durch Leno162 Rohdecke mit Unterdecke . . . . .                                 | 142 |
| 4.23 Eingangsakzeleranz Leno162 Rohdecke mit Unterdecke . . . . .                            | 143 |
| 4.24 Schallabstrahlung, Leno162 Rohdecke mit Unterdecke . . . . .                            | 144 |
| 4.25 Leno162, Rohdecke mit Unterdecke, Maxima der Eigenformen . . . . .                      | 148 |
| 4.26 Schnitt durch Leno162 Rohdecke mit Fließestrich . . . . .                               | 149 |
| 4.27 Eingangsakzeleranz Leno162 Rohdecke mit Fließestrich . . . . .                          | 150 |
| 4.28 Leno162, Rohdecke mit Fließestrich, Maxima der Eigenformen . . . . .                    | 153 |
| 4.29 Schnitt durch Leno162 Rohdecke mit Trockenestrich . . . . .                             | 154 |
| 4.30 Eingangsakzeleranz Leno162 Rohdecke mit Trockenestrich . . . . .                        | 155 |
| 4.31 Leno162, Rohdecke mit Trockenestrich, Maxima der Eigenformen . . . . .                  | 158 |
| 4.32 Messung Rohdeckenbeschleunigung durch Estrich, Foto . . . . .                           | 159 |
| 4.33 MAC Leno162 mit Rohdecke, Fließestrich und Unterdecke . . . . .                         | 161 |
| 4.34 MAC Leno162 mit Rohdecke, Trockenestrich und Unterdecke . . . . .                       | 162 |
| 4.35 Schnitt Leno162 Rohdecke mit Unterdecke und Fließestrich . . . . .                      | 163 |
| 4.36 Akzeleranzen Leno162 Rohdecke, Fließestrich und Unterdecke . . . . .                    | 164 |
| 4.37 Leno 162 Rohdecke mit Unterdecke und Fließestrich, Schallabstrahlung . . . . .          | 165 |
| 4.38 Leno162, Rohdecke mit Fließestrich und Unterdecke, Maxima der Eigenformen . . . . .     | 170 |
| 4.39 Schnitt Leno162 Rohdecke mit Unterdecke und Trockenestrich . . . . .                    | 171 |
| 4.40 Akzeleranzen Leno162 Rohdecke, Trockenestrich und Unterdecke . . . . .                  | 172 |
| 4.41 Leno 162 Rohdecke mit Unterdecke und Trockenestrich, Schallabstrahlung . . . . .        | 173 |
| 4.42 Leno162, Rohdecke mit Trockenestrich und Unterdecke, Maxima der Eigenformen . . . . .   | 181 |
| 4.43 Vergleich Abstrahlung UD unter Leno162 mit unterschiedlichen Aufbauten . . . . .        | 183 |
| 4.44 Leno162, Dämpfung und Eigenresonanzen in verschiedenen Ausbaustadien . . . . .          | 184 |
| 4.45 Eingangsakzeleranz der Einzelbalken für die Holzbalkendecke . . . . .                   | 186 |
| 4.46 Betriebsschwingungsformen der Einzelbalken für die Holzbalkendecke . . . . .            | 187 |
| 4.47 Schnitt Holzbalkendecke als Rohdecke . . . . .  | 188 |
| 4.48 Eingangsakzeleranz Holzbalkendecke als Rohdecke, zweiseitig gelagert . . . . .          | 188 |
| 4.49 Holzbalkendecke, Rohdecke, Maxima der Eigenformen . . . . .                             | 192 |
| 4.50 Schnitt Holzbalkendecke als Rohdecke . . . . .  | 193 |
| 4.51 Akzeleranzen Holzbalkendecke mit Unterdecke . . . . .                                   | 194 |
| 4.52 Holzbalkendecke mit Unterdecke, Schallabstrahlung . . . . .                             | 195 |
| 4.53 Holzbalkendecke, Rohdecke mit Unterdecke, Maxima der Eigenformen . . . . .              | 202 |
| 4.54 Schnitt Holzbalkendecke mit Unterdecke und Trockenestrich . . . . .                     | 203 |
| 4.55 Eingangsakzeleranz Holzbalkendecke mit Unterdecke und Trockenestrich . . . . .          | 204 |
| 4.56 Holzbalkendecke mit Unterdecke und Trockenestrich, Maxima der Eigenformen . . . . .     | 210 |
| 4.57 Schnitt Holzbalkendecke m. Unterdecke, Schüttung und Trockenestr. . . . .               | 211 |
| 4.58 Akzeleranzen von Holzbalkendecke mit Unterdecke, Schüttung und Trockenestrich . . . . . | 212 |
| 4.59 HBD mit Unterdecke, Trockenestrich und Schüttung, Maxima der Eigenformen . . . . .      | 217 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.60 | Maxima der Betriebsschwingformen von Estrich und Holzbalkendecke mit und ohne Schüttung . . . . .                  | 218 |
| 4.61 | Vergleich der Dämpfung der Holzbalken-Rohdecke mit verschiedenen Ausbauten   | 219 |
| 4.62 | Vergleich der maximalen Amplituden von TE und RD Leno162 und HBD . . . . .   | 220 |
| 4.63 | Schnitt Einzelelement der Hohlkastenträgerdecke . . . . .  | 222 |
| 4.64 | Hohlkastenträger, Einzelelemente, Maxima der Eigenformen . . . . .   | 225 |
| 4.65 | Schnitt Hohlkastenträger Rohdecke . . . . .  | 226 |
| 4.66 | Eingangszakzeleranz Rohdecke aus Hohlkastenträgern zweiseitig gelagert . . . . .                                   | 226 |
| 4.67 | Schallabstrahlung von Hohlkastenträger Rohdecke . . . . .  | 227 |
| 4.68 | Hohlkastenträger, Rohdecke, Maxima der Eigenformen . . . . .   | 231 |
| 4.69 | Schnitt Hohlkastenträg Doppелеlement . . . . .   | 232 |
| 4.70 | Eingangszakzeleranz zwei verbundener Hohlkastenträgerelemente . . . . .  | 232 |
| 4.71 | Hohlkastenträger, Doppелеlement, Maxima der Eigenformen . . . . .  | 236 |
| 4.72 | Schnitt Hohlkastenträger Doppелеlement mit Schüttung . . . . .   | 237 |
| 4.73 | Eingangszakzeleranz Hohlkastenträger Doppелеlement mit Schüttung . . . . .   | 237 |
| 4.74 | Hohlkastenträger, Doppелеlement mit Schüttung, Maxima der Eigenformen . . . . .                                    | 242 |
| 4.75 | Maxima Betriebsschwingform Hohlkastenträger Doppелеlement mit und ohne Schüttung . . . . .                         | 245 |
| 4.76 | Dämpfung von Hohlkastenträger Doppелеlement mit und ohne Schüttung . . . . .                                       | 246 |
| 4.77 | Vergleich der Dämpfungen aller Rohdeckenkonstruktionen . . . . .   | 247 |
| 5.1  | Dynamische Modelle von Schwingungstilgern . . . . .  | 250 |
| 5.2  | Model für Hauptsystem und Tilger als zwei Einmassenschwinger . . . . .   | 250 |
| 5.3  | Beispiel eines Schwingungstilgers für Holzdeckenkonstruktionen . . . . .   | 251 |
| 5.4  | Darstellung der sechs Freiheitsgrade eines einfachen Schwingungstilgers . . . . .                                  | 251 |
| 5.5  | Vergrößerungsfunktion eines Einmassenschwingers mit und ohne Tilger . . . . .                                      | 253 |
| 5.6  | Prinzipskizze für die Integration von Schwingungstilgern in Massivholzdecken . . . . .                             | 255 |
| 5.7  | Tilgerprüfstand . . . . .  | 257 |
| 5.8  | Vergrößerungsfunktion eines Schwingungstilgers im Tilgerprüfstand . . . . .  | 258 |
| 5.9  | Vergleich der Messwerte der Tilgereigenfrequenzen zu den Auslegungswerten . . . . .                                | 259 |
| 5.10 | Störgegenstände auf Standfläche des Tilgers . . . . .  | 259 |
| 5.11 | Schwingungstilger auf einer Testdecke aus Leno105 im Deckenprüfstand . . . . .                                     | 261 |
| 5.12 | Eingangszakzeleranz der BSH-Rohdecke aus Leno105 und zugehörige Eigenformen  | 262 |
| 5.13 | Positionsskizze der Schwingungstilger auf der BSH-Rohdecke aus Leno105 . . . . .                                   | 263 |
| 5.14 | Eingangszakzeleranz der BSH-Rohdecke aus Leno105 ohne, mit und mit verstimmteten Tilger . . . . .                  | 264 |
| 5.15 | Eingangszakzeleranz der BSH-Rohdecke aus Leno105 mit Unterdecke und zugehörige Schwingformen . . . . .             | 265 |
| 5.16 | Skizze der Knotenlinien und Tilgerpositionen auf Rohdecke für den Frequenzbereich von 40 Hz-100 Hz . . . . .       | 266 |
| 5.17 | Skizze der Tilgerpositionen auf der BSH-Rohdecke mit Unterdecke für den Frequenzbereich von 40 Hz-100 Hz . . . . . | 267 |
| 5.18 | Positionsskizze der Messpunkte und Laufweg des Gehers . . . . .  | 268 |



|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.19 | Eingangsakzeleranz der BSH-Rohdecke aus Leno105 mit Unterdecke mit und ohne Tilger . . . . .                          | 269 |
| 5.20 | Trittschallpegel der BSH-Rohdecke mit Unterdecke mit und ohne Tilger . . . . .  | 270 |
| 5.21 | Einfluss von Zusatzgewicht auf die Eingangsakzeleranz im Frequenzbereich von $5\text{ Hz} - 35\text{ Hz}$ . . . . .   | 271 |
| 5.22 | Einfluss von Zusatzgewicht auf die Eingangsakzeleranz im Frequenzbereich von $35\text{ Hz} - 140\text{ Hz}$ . . . . . | 272 |
| 5.23 | Vergleich der Tilgerpositionen vor und nach Reduzierung der Tilgerzahl . . . . .                                      | 273 |
| 5.24 | Eingangsakzeleranz der BSH-Rohdecke aus Leno105 mit UD vor und nach Reduktion der Tilgerzahl . . . . .                | 273 |
| 5.25 | Mittleres Schnellequadrat $v_{mean}^2$ auf der Unterdecke der HBD . . . . .   | 275 |
| 5.26 | Positionsskizze der Tilger 01 auf der Unterdecke der HBD . . . . .  | 276 |
| 5.27 | Einbau der Tilger 01 in der Unterdeckenkonstruktion . . . . .   | 277 |
| 5.28 | Schallabstrahlung der Unterdecke mit und ohne Tilger 01 und mit inaktiven Tilgern . . . . .                           | 278 |
| 5.29 | Trittschallpegel unter der Unterdecke mit und ohne Tilger 01 . . . . .  | 279 |
| 5.30 | Intensitätsspektrum unter der Unterdecke und Wirkungsbereich der Tilger 02 . . . . .                                  | 281 |
| 5.31 | Positionsskizze der Tilger 02 auf Unterdecke unter der HBD . . . . .  | 282 |
| 5.32 | Schallabstrahlung der Unterdecke mit und ohne Tilger 02 und bei inaktiven Tilgern . . . . .                           | 283 |
| 6.1  | Koordinatensystem im Holz . . . . .   | 287 |
| 6.2  | Material mit einer Symmetrieebene . . . . .   | 288 |
| 6.3  | mögliche Schnittarten von Holzbrettern . . . . .  | 291 |
| 6.4  | Fernfeld . . . . .  | 297 |
| 6.5  | Nahfeld . . . . .   | 298 |
| 6.6  | FFT der Schnelleverteilung einer endlichen Platte [29] . . . . .  | 299 |
| 6.7  | Abstrahlbedingung im Wellenzahl- und Ortsbereich [11] . . . . .   | 300 |
| 7.1  | EVA-Schema der FE-Simulation . . . . .  | 314 |
| 7.2  | Modularer Aufbau im Preprocessor . . . . .  | 320 |
| 7.3  | Brettspertholz . . . . .  | 322 |
| 7.4  | FE Ausschnitt BSD . . . . .   | 323 |
| 7.5  | Skizze Kertostreifen . . . . .  | 323 |
| 7.6  | FE Modell Plattenverbindung . . . . .   | 323 |
| 7.7  | SOLID185-Element [4] . . . . .  | 324 |
| 7.8  | COMBIN14-Element [4] . . . . .  | 325 |
| 7.9  | Reale Struktur HBD . . . . .  | 327 |
| 7.10 | FE Ausschnitt HBD . . . . .   | 328 |
| 7.11 | SOLID186-Element [4] . . . . .  | 329 |
| 7.12 | SHELL181-Element [4] . . . . .  | 330 |
| 7.13 | CONTA174-Element [4] . . . . .  | 330 |
| 7.14 | TARGE170-Element [4] . . . . .  | 331 |
| 7.15 | FE Ausschnitt HKD . . . . .   | 334 |
| 7.16 | Reale Struktur Fließestrich . . . . .   | 335 |

|   |     |
|---|-----|
| 7.17 FE Ausschnitt Estrich . . . . .  | 335 |
| 7.18 Reale Struktur Abgehängte Decke . . . . .  | 337 |
| 7.19 FE Ausschnitt abgehängte Decke . . . . .   | 338 |
| 7.20 BEAM188-Element [4] . . . . .  | 339 |
| 7.21 FLUID30-Element [4] . . . . .  | 339 |
| 7.22 FE Modell einfache Lagerung . . . . .  | 343 |
| 7.23 FE Modell Teileinspannung . . . . .  | 344 |
| 7.24 MASS21-Element [4] . . . . .   | 345 |
| 7.25 Skizze Elastomerlagerung . . . . .   | 345 |
| 7.26 FE Modell Elastomerlagerung . . . . .  | 346 |
| 7.27 Modularer Aufbau im Solution und Postprocessor (Ansys) . . . . .   | 348 |
| 7.28 10-Mode . . . . .  | 349 |
| 7.29 15-Mode . . . . .  | 349 |
| 7.30 Stochastische Flächenlast, Anregung im Ortsbereich . . . . .   | 352 |
| 7.31 Stochastische Flächenlast, Ergebnisse im Frequenzbereich . . . . .   | 353 |
| 7.32 Dynamische Nachgiebigkeit am Anregepunkt . . . . .   | 354 |
| 7.33 Prinzipskizze der Belastung mit dem Schritt-für-Schritt-Lastansatz [47] . . . . .  | 356 |
| 7.34 Beispiel für eine Schwingantwort eines Gehers mit 2 Hz Schrittfrequenz . . . . .   | 357 |
| 7.35 Modularer Aufbau . . . . .   | 359 |
| 7.36 Fouriertransformation . . . . .  | 362 |
| 7.37 K in 3D $z_p=40$ 100Hz . . . . .   | 364 |
| 7.38 K in 2D $z_p=40$ 100Hz . . . . .   | 364 |
| 7.39 Ausschnitt . . . . .   | 364 |
| 7.40 „Sprünge“ im Verlauf der Schalleistung aufgrund numerischer Artefakte . . . . .  | 365 |
| 7.41 Studie zur Reduktion numerischer Artefakte $z_p = 40$ . . . . .  | 366 |
| 7.42 Studie zur Reduktion numerischer Artefakte $z_p = 1$ . . . . .   | 366 |
| 7.43 Matrix $\bar{K}_\gamma$ nach Verfeinerung für $z_p = 40$ und $n_r = 15$ . . . . .  | 367 |
| 7.44 Matrix $\bar{K}$ nach Reduktion durch Mittelung gemäß Gl. (7.10) . . . . .   | 367 |
| 7.45 Exponentieller Anstieg des Rechenaufwands mit steigendem $z_p$ bei linearem Anstieg für die Verfeinerung $n_r$ . . . . .                                     | 368 |
| 7.46 Exemplarische Darstellung des Schalleistungspegels für die Konfiguration $z_p = 20$ (Zero-Padding) und $n_r = 30$ (Verfeinerung der Funktion $K$ ) . . . . . | 369 |
| 7.47 Amplitudenfrequenzgänge der Bewertungs- und Bandbegrenzungsfiler . . . . .   | 371 |
| 7.48 $KB$ - und $KB_F$ -Signal eines Gehers mit 2 Hz Schrittfrequenz . . . . .  | 372 |
| 8.1 Dodekaeder Lautsprecher [3], Quelle: Müller-BBM . . . . .   | 374 |
| 8.2 Messroboter [3] [50] . . . . .  | 374 |
| 8.3 Fenster mit Intensitätsmesssonde und Laserdopplervibrometer . . . . .   | 375 |
| 8.4 Skizze des Messaufbaus [3] [50], Quelle:Müller-BBM . . . . .  | 376 |
| 8.5 Vergleich der Schalleistungen aus Intensität und Schnelle . . . . .   | 377 |
| 8.6 Exemplarische Darstellung eines Amplitudenspektrums im Wellenzahlbereich . . . . .  | 379 |
| 8.7 Konvergenzstudie zur Elementgröße . . . . .   | 381 |
| 8.8 Ergebnisse der Rastersuche . . . . .  | 383 |



|      |   |     |
|------|---|-----|
| 8.9  | Schema Optimierungsprozess  | 384 |
| 8.10 | Vergleich der ersten beiden Eigenfrequenzen der Holzbalken  | 387 |
| 8.11 | Dichte und E-Modul der OSB-Platten  | 388 |
| 8.12 | Wellenzahlen der Unterdecke   | 391 |
| 8.13 | Unterdecke unter HBD  | 391 |
| 8.14 | Luft, modelliert durch Ersatzfedern   | 392 |
| 8.15 | Luft, modelliert mit Fluidelementen   | 392 |
| 8.16 | Vergleich der Schalleistung aus Intensität und Schnelle   | 393 |
| 8.17 | Vergleich der Messdaten mit unterschiedlichen Modellierungsarten  | 395 |
| 8.18 | Wellenzahlbereich an der Resonanz bei 135 Hz  | 396 |
| 8.19 | Ortsbereiche an der Resonanz bei 135 Hz   | 397 |
| 8.20 | Vergleich Messung/Simulation für BSD mit Unterdecke   | 398 |
| 8.21 | Vergleich Messung/Simulation für HBD mit Unterdecke   | 399 |
| 8.22 | Transfer Schalleistung; Vergleich des Einflusses der Aufnehmerabstände  | 400 |
| 8.23 | Shannon Kriterium im Wellenzahlbereich  | 401 |
| 8.24 | Bereich1  | 402 |
| 8.25 | Bereich2  | 403 |
| 8.26 | Bereich3  | 404 |
| 8.27 | Bereich4  | 405 |
| 9.1  | Einteilung der Anregepositionen   | 409 |
| 9.2  | Exemplarische Darstellung eines Eigenfrequenz-Nomogramms  | 418 |
| 9.3  | BSD-R Schalleistungs-Nomogramm: Längenverhältnis $\alpha = 1.4$ Steifigkeitsverhältnis $\beta = 26.4$ (Deckentyp 186) Variation von $n_p$ | 420 |
| 9.4  | ca.8 Hz (Biegung)   | 421 |
| 9.5  | ca.18 Hz (kurzwellig, Torsionsschwingungen der einzelnen Elemente)  | 421 |
| 9.6  | Vergleich Schalleistung zu äquivalenter abgestrahlter Leistung (mit Tilger)   | 421 |
| 9.7  | abgestrahlte Schalleistung aus Simulation mit unterschiedlicher Abhängehöhe $h$   | 424 |
| 9.8  | abgestrahlte Schalleistung aus Simulation mit unterschiedlicher Rasterweite $ax$ , mit und ohne Abhänger                                  | 424 |
| 9.9  | abgestrahlte Schalleistung aus Simulation mit unterschiedlichen Absorptionsgraden $damp$ , mit und ohne Abhänger                          | 425 |
| 9.10 | Mittelwert der abgestrahlten Schalleistung aus Simulationen für unterschiedliche Längenverhältnisse $\alpha$                              | 426 |
| 9.11 | Vergleich von Ausbauzuständen (R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz), Balkenabständen $ay$ in cm und Balkenbreiten $bb$ in cm             | 427 |
| 9.12 | Grafische Benutzeroberfläche  | 432 |



# Tabellenverzeichnis

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.1  | Rechenwerte Leno105 und Leno162 [36]   | 30  |
| 2.2  | Massen der Brettsperrholz Elemente aus Leno105 und Leno162   | 32  |
| 2.3  | Masse und Rohdichte von elf Einzelbalken der Holzbalkendecke                                       | 34  |
| 2.4  | Masse und Rohdichte der Hohlkastenträgerelemente   | 37  |
| 4.1  | Messergebnisse für die vier Leno105 Einzelelemente   | 102 |
| 4.2  | Messergebnisse für die vier Leno160 Einzelelemente   | 107 |
| 4.3  | Leno105 Rohdecke, zweiseitig gelagert, Messergebnisse  | 111 |
| 4.4  | Leno105 Rohdecke vierseitig gelagert, Messergebnisse   | 117 |
| 4.5  | Leno162 Rohdecke zweiseitig gelagert, Messergebnisse   | 123 |
| 4.6  | Leno162 Rohdecke vierseitig gelagert, Messergebnisse   | 130 |
| 4.7  | Leno105 Rohdecke mit Unterdecke, Messergebnisse  | 136 |
| 4.8  | Leno162 Rohdecke mit Unterdecke, Messergebnisse  | 145 |
| 4.9  | Leno162 Rohdecke mit Fließestrich, Messergebnisse  | 150 |
| 4.10 | Leno162 Rohdecke mit Trockenestrich, Messergebnisse  | 155 |
| 4.11 | Leno162 Rohdecke mit Fließestrich und Unterdecke, Messergebnisse                                   | 166 |
| 4.12 | Leno162 Rohdecke mit Trockenestrich und Unterdecke, Messergebnisse                                 | 174 |
| 4.13 | Einzelbalken für Holzbalkendecke, Messergebnisse   | 187 |
| 4.14 | Holzbalkendecke Rohdecke, Messergebnisse   | 189 |
| 4.15 | Holzbalkendecke mit Unterdecke, Messergebnisse   | 196 |
| 4.16 | Holzbalkendecke mit Unterdecke und Trockenestrich, Messergebnisse                                  | 205 |
| 4.17 | Holzbalkendecke mit Unterdecke, Trockenestr. und Schüttung, Messergebnisse                         | 213 |
| 4.18 | Hohlkastenträger Einzelelemente, Messergebnisse  | 223 |
| 4.19 | Hohlkastenträger Rohdecke, Messergebnisse  | 228 |
| 4.20 | Hohlkastenträger Doppelelement, Messergebnisse   | 233 |
| 4.21 | Hohlkastenträger Doppelelement mit Schüttung, Messergebnisse                                       | 238 |
| 4.22 | Vergleich der ersten vier Resonanzfrequenzen der Hohlkastenträger ohne Schüttung und mit Schüttung | 244 |
| 4.23 | Dämpfungsmaße der Rohdecken aus Brettsperrholz mit verschiedenen Aufbauten                         | 248 |
| 4.24 | Dämpfungsmaße der Holzbalkendecke mit verschiedenen Aufbauten                                      | 248 |
| 4.25 | Dämpfungsmaße der Hohlkastenträgerdecke im Frequenzbereich bis 20 Hz mit verschiedenen Aufbauten   | 248 |
| 5.1  | Abhängigkeit der modalen Masse von der Auflagerung   | 254 |
| 5.2  | Resonanzfrequenzen von Tilgern bei verschiedenen Störungen der Standfläche                         | 260 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.3  | Resonanzfrequenzen eines Tilger bei Variation der Anregung . . . . .                  | 260 |
| 5.4  | Übersicht Tilger für Leno105 Rohdecke . . . . .                                       | 263 |
| 5.5  | Übersicht Tilger für Leno105 Rohdecke mit Unterdecke . . . . .                        | 267 |
| 5.6  | $KB_{F_{max}}$ -Werte mit und ohne Tilger bei Anregung durch Geher . . . . .          | 268 |
| 5.7  | Mittelwerte der Resonanzfrequenzen Unterdeckentilger 01 . . . . .                     | 275 |
| 5.8  | Mittelwerte der Resonanzfrequenzen Unterdeckentilger 02 . . . . .                     | 280 |
|      |   |     |
| 7.1  | Übersicht über die untersuchten Kombinationen . . . . .                               | 317 |
| 7.2  | Modulübergreifende Parameter . . . . .  | 321 |
| 7.3  | Querschnittabmessungen der BSD-Typen 105 und 162 . . . . .                            | 326 |
| 7.4  | Parameter BSD-Modul . . . . .   | 327 |
| 7.5  | Geometrische Parameter HBD . . . . .  | 332 |
| 7.6  | Materialparameter Fichte(HBD) . . . . .   | 332 |
| 7.7  | Materialparameter OSB . . . . .   | 333 |
| 7.8  | Geometrische Parameter Estrich . . . . .  | 336 |
| 7.9  | Materialparameter Estrich und Trittschalldämmung . . . . .                            | 336 |
| 7.10 | Bauteilabmessungen . . . . .  | 340 |
| 7.11 | Geometrische Parameter abgehängte Decke . . . . .                                     | 341 |
| 7.12 | Materialparameter abgehängte Decke . . . . .  | 342 |
| 7.13 | Parameter Elastomerlagerung . . . . .   | 347 |
| 7.14 | Parameter der harmonischen Analysen . . . . .   | 350 |
| 7.15 | Parameter Dämpfung . . . . .  | 351 |
| 7.16 | Parameter transiente dynamische Analyse . . . . .                                     | 358 |
| 7.17 | Anhaltswerte für Geschossdecken im Wohn- und Industriebau nach VDI2038 [56] . . . . . | 372 |
|      |   |     |
| 8.1  | Raster für die Steifigkeitswerte der Brettsperrholdecke . . . . .                     | 382 |
| 8.2  | Raster für die Steifigkeitswerte der Brettsperrholdecke . . . . .                     | 382 |
| 8.3  | Optimierungsergebnis nach Einbeziehung aller Messungen . . . . .                      | 385 |
| 8.4  | Materialparameter aus Datenblatt AGEPAN OSB/4 PUR . . . . .                           | 387 |
| 8.5  | Messergebnisse der OSB Platten . . . . .  | 389 |
| 8.6  | Materialparameter aus Datenblatt GKB A . . . . .                                      | 390 |
| 8.7  | Feder- und Dämpfungskonstante Direktschwingabhänger . . . . .                         | 392 |
|      |   |     |
| 9.1  | Geometrische Parameter für Parameterstudie (BSD-R alle Typen) . . . . .               | 412 |
| 9.2  | Parameter für Parameterstudie (BSD RU+RUE Typ 165) . . . . .                          | 413 |
| 9.3  | Geometrische Parameter für Parameterstudie (BSD RD) . . . . .                         | 414 |
| 9.4  | Geometrische Parameter für Parameterstudie (BSD RD FE/TE) . . . . .                   | 414 |
| 9.5  | Geometrische Parameter für Parameterstudie (BSD RD UD,RD UD FE/TE) . . . . .          | 414 |
| 9.6  | Geometrische Parameter für Parameterstudie (HBD RD) . . . . .                         | 415 |
| 9.7  | Geometrische Parameter für Parameterstudie (HBD RE) . . . . .                         | 416 |
| 9.8  | Geometrische Parameter für Parameterstudie (HBD, RD UD,RD UD TE/FE) . . . . .         | 416 |
| 9.9  | Auswirkung der Änderung der Parameter auf die abgestrahlte Schallleistung . . . . .   | 429 |

# Abkürzungsverzeichnis

|             |                                      |
|-------------|--------------------------------------|
| <b>APDL</b> | Anslys Parametric Design Language    |
| <b>BSA</b>  | Betriebsschwinganalyse               |
| <b>BSD</b>  | Brettsperrholzdecke                  |
| <b>BSH</b>  | Brettsperrholz                       |
| <b>DE</b>   | Doppelement                          |
| <b>ERP</b>  | Effektive abgestrahlte Schalleistung |
| <b>FE</b>   | Fließestrich                         |
| <b>FFT</b>  | Schnelle Fouriertransformation       |
| <b>HBD</b>  | Holzbalkendecke                      |
| <b>HKD</b>  | Hohlkastenträgerdecke                |
| <b>ITM</b>  | Integraltransformationsmethoden      |
| <b>MAC</b>  | Model-Assurance-Criterion            |
| <b>MW</b>   | Mittelwert                           |
| <b>RD</b>   | Rohdecke                             |
| <b>STAW</b> | Standardabweichung                   |
| <b>STG</b>  | Schüttung                            |
| <b>TE</b>   | Trockenestrich                       |
| <b>UD</b>   | Unterdecke                           |



# 1 Zusammenfassung

## 1.1 Motivation

Zur Beschreibung des vibroakustischen Verhaltens von Holzdecken im Frequenzbereich bis ca. 125 Hz stehen derzeit keine für die Praxis aufbereiteten, etablierten Verfahren zur Verfügung. So wird die Wirkung von Maßnahmen wie z.B. abgehängter Decken, schwimmender Estriche und anderer Schwingungsschutzsysteme in der Regel über stark vereinfachende Ingenieursersatzverfahren beschrieben, die sich im Massivbau bewährt haben, im Holzbau jedoch aufgrund der vergleichsweise geringeren Impedanzen aller Systemkomponenten an ihre Anwendungsgrenzen stoßen. Entsprechende Grenzen erfährt aufgrund der größeren Komplexität der Schwingungsmuster der Holzdeckenkonstruktionen unter dynamischer Anregung auch ein einfaches Konzept zur Beschreibung der abgestrahlten Schalleistung über Schwingamplituden und Abstrahlgrade, welches sich im Massivbau, z.B. bei Fragen zum sekundären Luftschall, ebenfalls gut bewährt hat. Zudem weisen Holzdeckenkonstruktionen gegenüber Massivdecken höhere modale Dichten und eine größere Heterogenität zwischen den einzelnen Eigenschwingformen auf. Aufgrund dieser Komplexität stellte sich die Frage nach den grundsätzlichen Möglichkeiten zur numerischen Berechnung des vibroakustischen Verhaltens von Holzdeckenkonstruktionen und der Möglichkeit der systematisierten Beschreibung des Verhaltens in Form von Planungshilfen für die Praxis.

## 1.2 Vorhaben

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken und zur Bewertung und Dimensionierung von angepassten Schwingungsschutzsystemen“ wurden umfangreiche Messungen an charakteristischen Holzdecken durchgeführt sowie zugehörige hybride Finite-Element- und Abstrahlungsmodelle erstellt, die anhand

der Messergebnisse kalibriert werden konnten. Basierend auf diesen Modellen konnten über weiterführende, parametrisierte Berechnungen zum schall- und schwingungstechnischen Verhalten der Deckensysteme bei tiefen Frequenzen bis ca.  $125\text{ Hz}$  die physikalischen Experimente durch „numerische Experimente“ ergänzt werden. Damit wurde der Parameterraum von den zwangsläufig engen Vorgaben aus dem physikalischen Experiment auf breite, baupraktisch übliche Bereiche erweitert.

Als Holzdeckensysteme wurden Brettsperrholzdecken, Holzbalkendecken sowie eine Variante einer Hohlkastendecke untersucht. Weiterführende Systemvarianten ergaben sich aus verschiedenen Ausbauzuständen mit Estrich und abgehängter Unterdecke. Damit waren die klassischen Ausbildungen von Holzdeckenkonstruktionen, die beim mehrgeschossigen Wohnungs- und Objektbau ihren Einsatz finden, abgebildet. Dort ist der Schwingungsnachweis als Teil des Gebrauchstauglichkeitsnachweises sowie die Trittschalldämmung als Teil des Schallschutznachweises zur Erfüllung normativer Anforderungen zu führen.

Da die Einhaltung dieser Nachweise für Holzdeckenkonstruktionen, insbesondere eines benutzerfreundlichen Trittschallschutzes bei tiefen Frequenzen unter  $100\text{ Hz}$ , mangels verlässlicher bzw. mit nur bauteilspezifischen Planungsdaten zu einer unwirtschaftlichen Überdimensionierung dieser Holzdeckensysteme führt, sollte dieses Forschungsvorhaben Planungshilfen ausarbeiten, um verlässliche Planungsdaten zur Verfügung zu stellen und Überdimensionierungen zu vermeiden und verlässliche Planungsdaten zur Verfügung zu stellen.

Die Messungen erfolgten im Prüfstand des Labors für Schallmesstechnik an der Hochschule Rosenheim. Die Durchführung im Laborprüfstand ermöglichte die Entwicklung und Verwendung spezialisierter Messverfahren. Besonderes Augenmerk wurde auf die Sicherstellung einer hohen Messreproduzierbarkeit sowie einer Optimierung der Lagerungsbedingungen der Deckensysteme hinsichtlich einer Abbildung derselben in den FE-Modellen gelegt. Als messtechnische Eingangsdaten für die FE-Modellierung wurden Akzeleranzen sowie Abstrahlgrade verwendet. Ferner wurden ergänzende messtechnische Untersuchungen an Komponenten durchgeführt.

Weiterhin wurden Schwingungstilger als mögliche Verbesserungsmaßnahme hinsichtlich des Schwingungsverhaltens (Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit) als auch hinsichtlich der Dämpfung der schallabstrahlenden Fläche bei tiefen Frequenzen (Erhöhung des Trittschallschutzes) messtechnisch untersucht.

Die numerischen Simulationen erfolgten über eine parametrisierte FE-Modellierung in ANSYS® sowie einem Postprocessing der Ergebnisdaten in MATLAB®. Als Analysen wurden Modalanaly-



sen, harmonische Analysen bei Aufbringung von Einzellasten sowie einer stochastischen Flächenlast (rain-on-the-roof) sowie transiente Analysen zur Ermittlung der schall- und schwingungstechnischen Eigenschaften beim Begehen der Deckensysteme durch Personen durchgeführt. Zur Kalibrierung der FE-Modelle musste für Holz als anisotropes Material ein entsprechendes Materialmodell abgeleitet werden. Mit Hilfe eines Modell-Updating-Prozesses und Optimierungsalgorithmen konnten die materialbezogenen Eingangsparameter für alle in den Konstruktionen verwendeten Materialien und Komponenten optimal angepasst werden. Zur Qualitätssicherung der FE-Modelle wurden eine Reihe von Konvergenzstudien, z.B. zum Modellparameter Elementgröße, zu den Randbedingungen, zu den Kopplungen der einzelnen Deckenelemente usw. durchgeführt. Weiterhin musste eine aufwändige Modellierung der Luft in den Gefachen von Holzdeckenkonstruktionen zur Abbildung der Fluid-Struktur-Kopplung entwickelt werden.

Zur Berechnung der abgestrahlten Schalleistung bei harmonischen und transienten Anregungen wurde ein Rechenverfahren entwickelt, welches aus den berechneten Verformungen der abstrahlenden Fläche - basierend auf einer Integraltransformation und nach Rücktransformation vom Wellenzahlbereich - die abgestrahlte Schalleistung berechnet. Daraus kann der Abstrahlgrad abgeleitet werden. Das Rechenverfahren wurde durch die experimentelle Ermittlung der abgestrahlten Schalleistung validiert.

Mit den entwickelten FE-Modellen erfolgte eine Reihe von Berechnungen der abgestrahlten Schalleistung im Frequenzbereich bis einschließlich des Terzbandes bei  $125\text{ Hz}$  unter Variation zahlreicher Parameter. Zur Darstellung der umfangreichen Parameterstudien wurde eine Reduktion über dimensionslose Kenngrößen gemäß dem Buckingham-Pi-Theorem durchgeführt. Es ergaben sich dabei übersichtliche Nomogramme, die ein detailliertes Berechnen von Systemen, insbesondere im Hinblick auf die zu erwartenden Eigenschwingungen, aber auch die Veränderung durch Schwingungsschutzsysteme, wie z.B. aufgebrachte schwimmende Estriche, nicht mehr erforderlich macht und eine gute Verwendbarkeit in späteren planerischen Anwendungen gewährleistet.

Für den Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurden die Berechnungsergebnisse ferner in Form eines Programms mit einer grafischen Eingabeoberfläche hinterlegt. Auswählbar für den Anwender sind das Holzdeckensystem in den möglichen Ausbauständen eines schwimmenden Estrichs und einer abgehängten Unterdecke sowie die geometrischen Abmessungen der Decke. Weiterhin kann die Anregungsart der Decke variiert werden; es besteht die Möglichkeit zur Wahl zwischen einer Anregung mit dem Normhammerwerk, einem Fußgänger sowie einer benutzereigenen, spektral vorzugebenden Anregungsart. Als Ergebnis wird der abgestrahlte

Schallleistungspegel berechnet. Aus der linearen Frequenzdarstellung des Schallleistungspegels kann die erste Eigenfrequenz für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis abgelesen werden, für schalltechnische Belange erfolgt die Darstellung des Schallleistungspegels als Terzspektrum. Weiterhin wurde eine Ergebnistabelle erstellt, die für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis verwendbare Dämpfungsgrade von Holzdeckensystemen in unterschiedlichen Ausbauständen zur Verfügung stellt.

Es lässt sich festhalten, dass auf Grund der vielen, grundlagenorientierten, für die Ergebnisse notwendigen, aber doch nicht als Teil des Forschungsvorhabens zu bezeichnenden messtechnischen und v.a. numerischen Untersuchungen die im Forschungsantrag formulierten Ziele übererfüllt wurden. Die daraus erarbeiteten Ergebnisse können äußerst gewinnbringend für zukünftige Untersuchungen dienen.

Im Einzelnen erwähnenswert sind:

- Die Bedeutung der Randbedingungen für reproduzierbare und für eine Kalibrierung von numerischen Modellen geeigneten Versuchsaufbauten konnte klar herausgearbeitet werden. Zukünftige Untersuchungen können unmittelbar auf die hier gewonnenen Erkenntnisse aufbauen.
- Die numerische Modellierung von Holzdeckenkonstruktionen im vibroakustischen Bereich bis in den Frequenzbereich von  $125\text{ Hz}$  unter Einbeziehung von Fragestellungen der Fluid-Struktur Wechselwirkung, einschließlich der Beschreibung der dadurch hervorgerufenen Abstrahlung, war mit der hier gewählten systematischen Auswertung über breite Parameterbereiche Neuland. Dabei zeigte es sich, dass die Holzdeckenkonstruktionen mithilfe kommerzieller Finite-Elemente-Programme abgebildet werden können. Dies erfordert Ansätze, welche über einfache Finite-Element Modelle hinausgehen: Beispielhaft genannt sei die vibroakustische Modellierung von Holzdeckenkonstruktionen mit abgehängten Unterdecken, die eine besondere Herausforderung darstellte. Es zeigte sich, dass die Abbildung einer abgehängten Decke mit den in der Praxis häufig verwendeten vereinfachten Ersatzmodellen über eine elastische Kopplung durch das Luftvolumen und parallel geschalteten Abhängern für die Beschreibung des Schwingungsverhaltens nicht geeignet ist und eine gekoppelte Fluid- Struktur-Simulation durchgeführt werden muss.
- Ferner zeigte sich, dass einer pauschalen Beschreibung des Abstrahlverhaltens über Abstrahlgrade - wie es bei Massivdecken üblich ist – sehr enge Grenzen gesetzt sind. Dies



ist durch die bei einigen Systemen vorliegende, sehr unterschiedliche Abstrahlcharakteristik einzelner, hinsichtlich der Eigenfrequenz nahe beieinanderliegenden Eigenschwingformen bedingt. Der Abstrahlgrad wird im erheblichen Maße frequenzabhängig. Insofern ist es erforderlich, im untersuchten Frequenzbereich Betriebsschwingungsformen numerisch zu ermitteln und auf Grundlage dieser die Abstrahlung über einen Wellenzahlansatz zu erfassen. Die zugehörigen physikalischen Phänomene konnten im Bildraum der Integraltransformationen gut interpretiert werden.

Die im Forschungsvorhaben erarbeiteten Ergebnisse, sowohl die lt. Forschungsantrag zu erzielenden als auch die o.g. weiterführenden Ergebnisse wurden und werden in einer Reihe von Vorträgen und Veröffentlichungen auf einschlägigen Fachtagungen präsentiert.



## 2 Beschreibung der zu untersuchenden Deckensysteme

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden unterschiedliche Aufbauten von Holzdecken hinsichtlich ihrer vibroakustischen Eigenschaften untersucht. Darüber hinaus werden Verbesserungsmaßnahmen in Form von schwimmenden Estrichen und abgehängten Unterdecken bewertet.

### 2.1 Auswahl von Tragsystemen

Bei den ausgewählten Tragsystemen handelt es sich um folgende drei typische Holzdeckenkonstruktionen:

- Brettsperrholzdecke (BSD)
- Holzbalkendecke (HBD)
- Hohlkastenträgerdecke (HKD)

Als Massivholzdecken wurden zwei Brettsperrholzdecken, produziert von der Firma Merk Holzbau, verwendet. Die Holzbalkendecke wurde von der Firma Regnauer bereitgestellt. Bei der Hohlkastenträgerdecke handelt es sich um ein Produkt der Firma Lignotrend.

Im modernen Holzbau sind viele verschiedene Konstruktionsvarianten gängig. Die ausgewählten Konstruktionen bilden die gängigsten Bauweisen ab. Sonderkonstruktionen, wie sie speziell von kleineren Firmen oft eingesetzt werden, können hierbei nicht berücksichtigt werden.

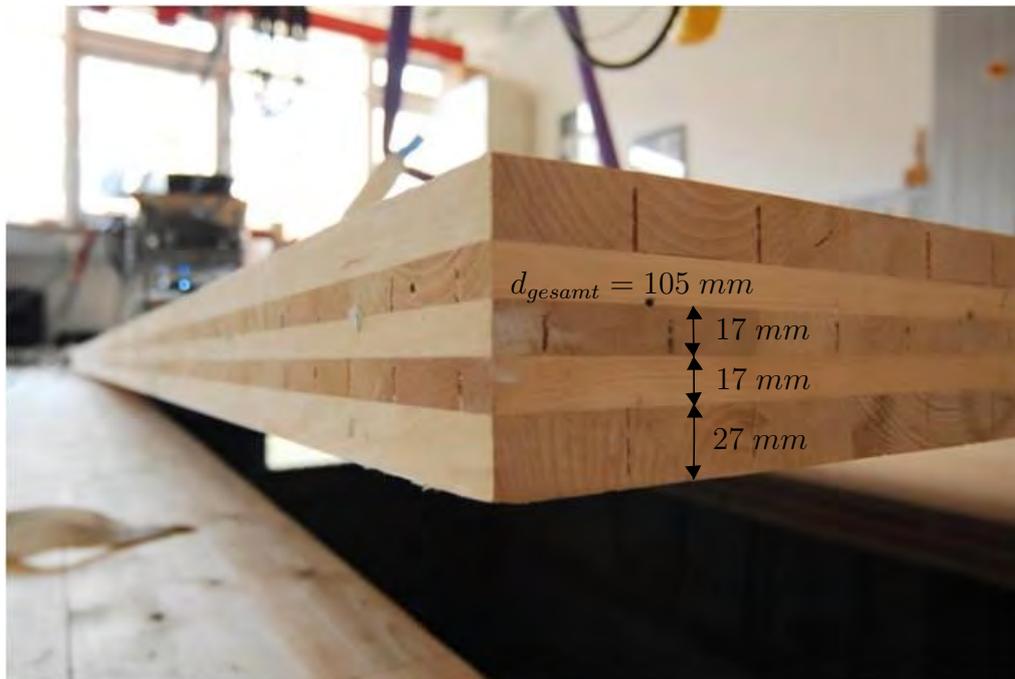
**Tabelle 2.1:** Rechenwerte Leno105 und Leno162 [36]

|                              |           | Leno105 | Leno162 |                         |
|------------------------------|-----------|---------|---------|-------------------------|
| Elementdicke                 |           | 105     | 162     | <i>mm</i>               |
| Elastizitätsmodul            | parallel  | 8900    | 8900    | <i>MN/m<sup>2</sup></i> |
|                              | senkrecht | 1100    | 1100    | <i>MN/m<sup>2</sup></i> |
| Schubmodul                   |           | 60      | 60      | <i>MN/m<sup>2</sup></i> |
| Eigenlast (Herstellerangabe) |           | 0.56    | 0.86    | <i>kN/m<sup>2</sup></i> |
| Eigenlast (gemessen)         |           | 0.46    | 0.71    | <i>kN/m<sup>2</sup></i> |
| Trägheitsradius              | parallel  | 3.48    | 4.92    | <i>cm</i>               |
|                              | senkrecht | 1.77    | 1.83    | <i>cm</i>               |
| Nettoquerschnitt             | parallel  | 71      | 108     | <i>mm</i>               |
|                              | senkrecht | 34      | 54      | <i>mm</i>               |

### 2.1.1 Brettsperrholzdecke

Die eingesetzte Decke aus Brettsperrholz (BSH) besteht aus dem Deckensystem „Leno<sup>®</sup> 105 Typ 2“ der Firma Merk Holzbau und wird aus Fertigteilelementen mit einer Länge von  $5.50\text{ m}$  und einer Breite von  $1.37\text{ m}$  zusammengesetzt. Die Elemente bestehen aus fünf Schichten, wobei die drei inneren Schichten jeweils eine Dicke von  $d = 17\text{ mm}$  und die beiden äußersten Schichten von jeweils  $d = 27\text{ mm}$  haben (s. Abb. 2.1). Für die Untersuchungen werden vier Elemente jeweils im Stoßbereich durch eingelassene Furnierschichtholzstreifen vom Typ Kerto<sup>®</sup> mit einer Stärke von  $27\text{ mm}$  verbunden (s. Abb. 2.2). Die Kerto-Streifen werden alle  $50\text{ cm}$  mit Holzschrauben  $6 \times 80\text{ mm}$  verbunden. Der Aufbau der einzelnen Elemente besteht aus fünf flächig verleimten Schichten (s. Abb. 2.1), wobei die äußeren Schichten eine Stärke von  $27\text{ mm}$ , die übrigen Schichten eine Stärke von  $17\text{ mm}$  aufweisen. Laut Herstellerangaben [36] wird für dieses Produkt maschinell getrocknetes Fichtenholz der Festigkeitsklasse C24 verwendet. Die Verleimung der einzelnen Schichten erfolgt bei diesem Deckentyp mit Polyurethan oder Melaminharz. In Tabelle 2.1 sind die vom Hersteller zur Verfügung gestellten Rechenwerte aufgeführt. Es handelt sich hierbei um Rechenwerte für Tragwerksberechnungen, bei denen die Orthotropie des Materials durch zu Null setzen der Elastizitätsmoduli quer zur Faserrichtung berücksichtigt wurde.

Obwohl Finnforest für die durch die Abmessungen des Versuchstandes vorgegebene Spannweite von  $5.50\text{ m}$  aus statischen Gründen mindestens „Leno 153 Typ 1“ empfiehlt - in der Bezei-

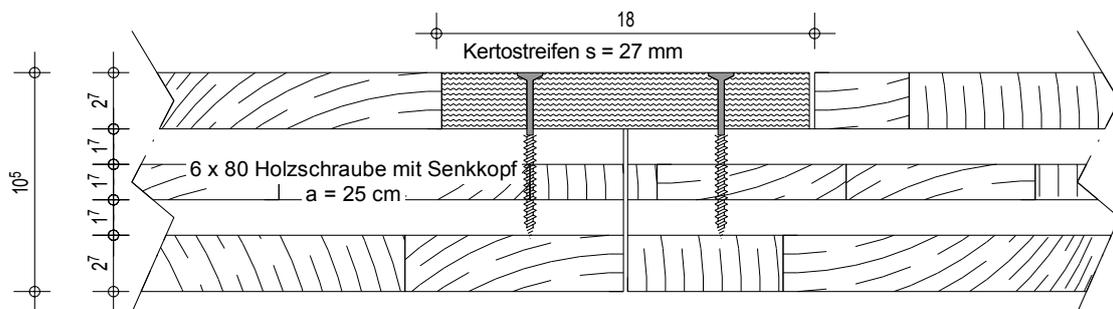


**Abbildung 2.1:** Schichtaufbau von Brettsperreholzelementen Leno 105

chung findet sich die Dicke des Gesamtquerschnitts von  $153 \text{ mm}$  - wird „Leno 105 Typ 2“ eingesetzt, welches eine Gesamtdicke von  $105 \text{ mm}$  aufweist. Der niedrige Querschnitt wird gewählt, da hierdurch eine Decke eingebaut ist, welche die Anforderungen an den Schwingungsschutz [15] deutlich unterschreitet. Durch die geringe Steifigkeit eignet sich das System besonders gut, um später Untersuchungen mit Schwingungsschutzsystemen, bestehend aus Schwingungstilger (s. Kapitel 5) durchzuführen. Im Anschluss an die Decke mit einer Stärke von  $105 \text{ mm}$  wird eine Decke vom Typ Leno162 eingebaut, welche alle statischen Vorgaben an ein System dieser Spannweite erfüllt, jedoch die Anforderungen an den Schwingungsschutz ebenfalls nicht einhält. Die Elemente dieser zweiten Decke bestehen aus sechs Schichten mit einer Stärke von je  $27 \text{ mm}$ . Dabei sind die zwei mittleren und die äußersten Schichten in Längsrichtung und die dazwischen liegenden in Querrichtung verleimt. Durch die Untersuchungen an zwei Decken mit unterschiedlicher Stärke kann das generierte FEM-Model genauer kalibriert werden. Die flächenbezogene Masse des der Leno105 Elemente beträgt:  $m'_{L105} = 47 \text{ kg/m}^2$  und bei Leno162:  $m'_{L162} = 73 \text{ kg/m}^2$ . Die Massen der einzelnen Elemente und die daraus resultierenden Rohdichten finden sich in Tabelle 2.2.



(a) Ansicht von oben

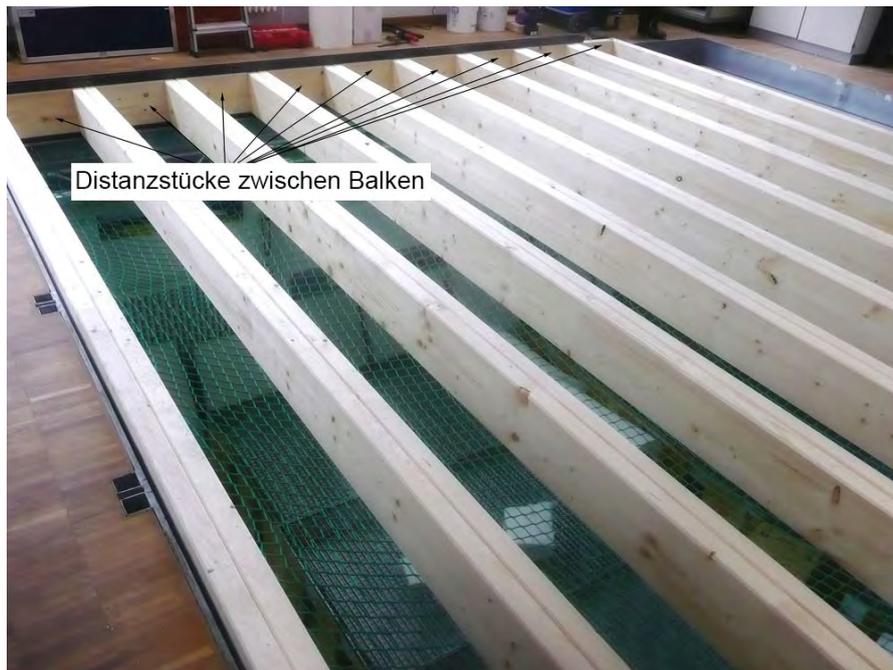


(b) Schnitt durch Verbindung

**Abbildung 2.2:** Verbindung der Stoßfugen mit Kerto<sup>®</sup>-Streifen

**Tabelle 2.2:** Massen der Brettsper Holz Elemente aus Leno105 und Leno162

|            | Leno105                 |  | Leno162                 |  |
|------------|-------------------------|--|-------------------------|--|
|            | Masse<br><i>m</i> in kg | Rohdichte<br>$\rho$ in kg/m <sup>3</sup> | Masse<br><i>m</i> in kg | Rohdichte<br>$\rho$ in kg/m <sup>3</sup> |
| Element 1  | 372                     | 470                                      | 548                     | 455                                      |
| Element 2  | 343                     | 434                                      | 544                     | 451                                      |
| Element 3  | 368                     | 465                                      | 542                     | 449                                      |
| Element 4  | 339                     | 428                                      | 559                     | 464                                      |
| Mittelwert | 356 ± 15                | 449 ± 19                                 | 548 ± 7                 | 455 ± 6                                  |



**Abbildung 2.3:** Balkenlage der Holzbalkendecke im Einbau. Im Bereich der Auflager sind die Distanzstücke zwischen den Doppelbalken zu erkennen

## 2.1.2 Holzbalkendecke

Neben der immer weiter verbreiteten Massivholzbauweise werden nach wie vor viele Decken als Holzbalkendecken gebaut. Im Vergleich zu den Massivholzdecken ist die benötigte Holzmenge deutlich geringer, die Aufbauhöhen sind allerdings größer. Holzbalkendecken können auch von kleinen Firmen vollständig gebaut werden, ohne dass fertig verleimte Elemente zugekauft werden müssen. Bei der hier untersuchten Decke handelt es sich um eine Konstruktion der Firma Regnauer. Die Balken sind aus Fichtenholz der Festigkeitsklasse C24 gefertigt. Das Deckensystem besteht immer aus zwei zu einem Doppelbalken verschraubten Einzelbalken mit einem Querschnitt von je  $60 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$  (s. Abb. 2.3). Je nach Spannweite und statischen Anforderungen wird der Abstand zwischen den Doppelbalken variiert. Für die im Deckenprüfstand eingebaute Decke beträgt der Balkenabstand  $490 \text{ mm}$ . Damit werden die statischen Anforderungen für eine Wohnungstrenndecke gemäß EC5 [15] erfüllt, die erforderlichen Nachweise für den Schwingungsschutz nach EC5 werden jedoch nicht eingehalten. Als Decklage werden OSB-Platten mit einer Stärke von  $18 \text{ mm}$  auf die Balken gelegt und alle  $15 \text{ cm}$  mit  $5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  Holzschrauben verschraubt (s. Abb. 2.4, 2.5 und 2.6).

Zwischen den einzelnen Doppelbalken sind im Bereich des Auflagers kurze Balkenstücke als Di-

**Tabelle 2.3:** Masse und Rohdichte von elf Einzelbalken der Holzbalkendecke

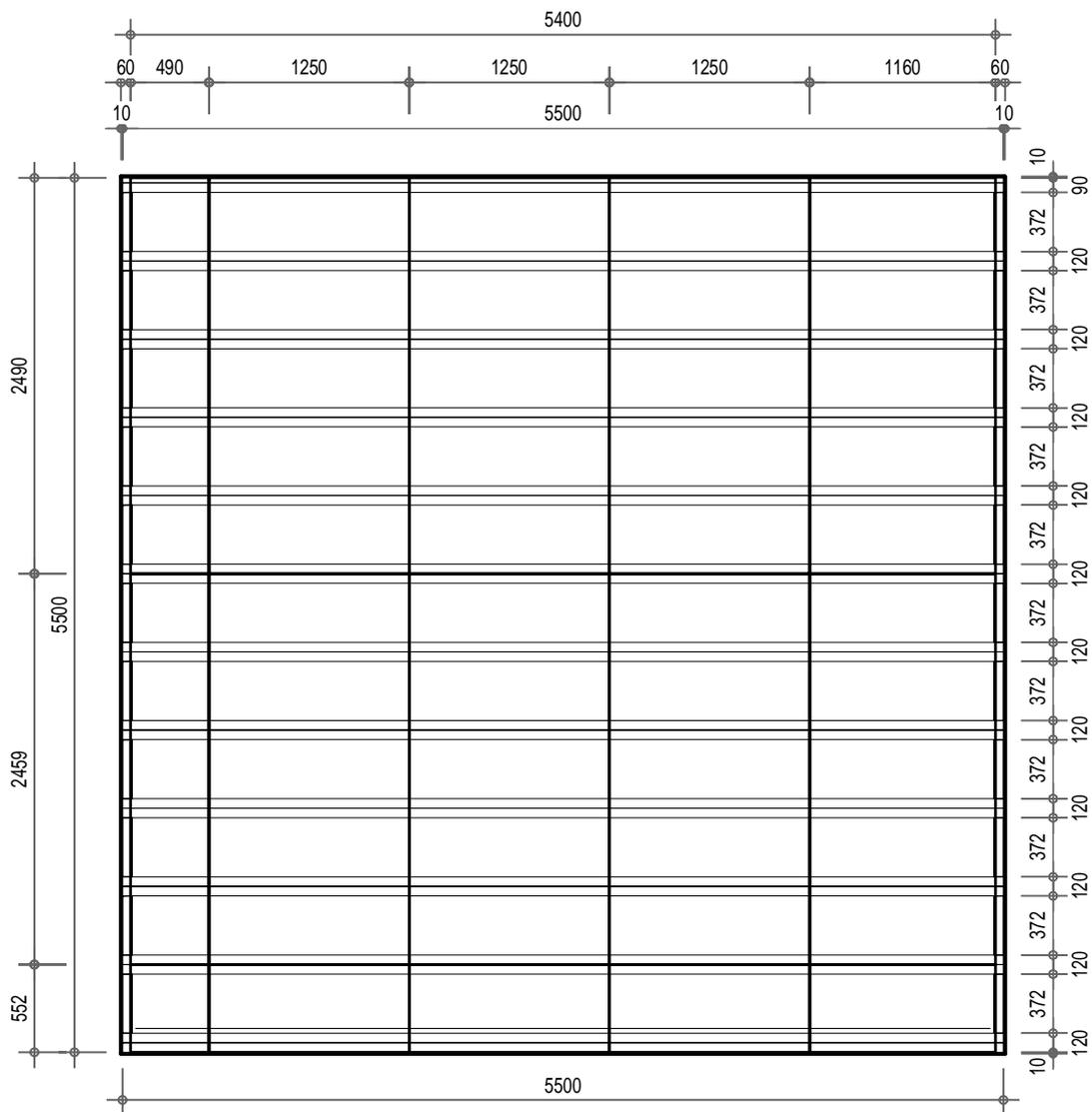
|            | Masse<br>$m$ in $kg$ | Rohdichte<br>$\rho$ in $kg/m^3$ |
|------------|----------------------|---------------------------------|
| Balken 1   | 31.9                 | 403                             |
| Balken 2   | 34.6                 | 437                             |
| Balken 3   | 36.2                 | 456                             |
| Balken 4   | 37.3                 | 471                             |
| Balken 5   | 33.2                 | 419                             |
| Balken 6   | 27.5                 | 348                             |
| Balken 7   | 37.5                 | 474                             |
| Balken 8   | 39.1                 | 493                             |
| Balken 9   | 36.5                 | 460                             |
| Balken 10  | 37.0                 | 467                             |
| Balken 11  | 28.9                 | 365                             |
| Mittelwert | $34.5 \pm 3.7$       | $436 \pm 47$                    |

stanzstücke eingefügt, welche die Balken auch gegen Kippen sichern. Für den Einbau im Labor werden deshalb zunächst einzelne Kastenelemente mit je zwei Balken und dem dazugehörigen Zwischenstück gefertigt und in den Prüfstand eingebracht. Die nebeneinander liegenden Balken werden anschließend alle  $50\text{ cm}$  mit  $6\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  Holzschrauben verbunden. Im Bereich der Auflager wird die Decke wie in Kapitel 3.6.4 beschrieben nach unten verspannt.

Elf der einzelnen Balken werden nach der Demontage der Decke gewogen. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 2.3. Die flächenbezogene Masse der gesamten Rohdeckenkonstruktion mit Beplankung beträgt  $m' = 39\text{ kg/m}^2$ .

### 2.1.3 Hohlkastenträgerdecke

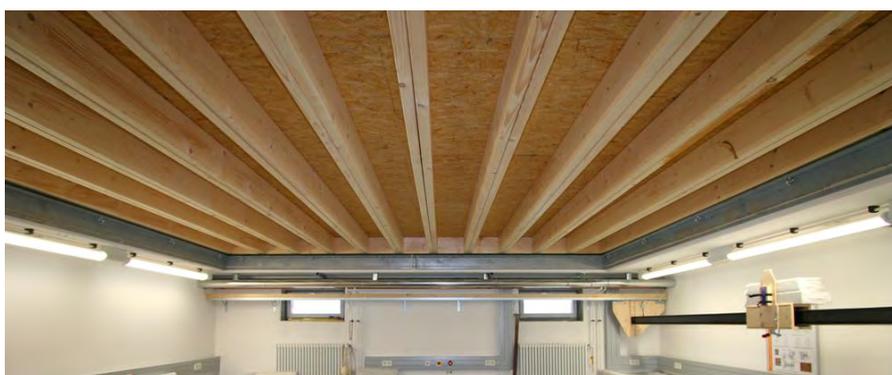
Hohlkastenträgerdecken werden in unterschiedlichsten Varianten von verschiedenen Herstellern gebaut. Sie haben den Vorteil eines geringeren Holzbedarfs gegenüber den Massivholzkonstruktionen und können mit einem hohen Vorfertigungsgrad auf die Baustelle geliefert werden. Die Hohlräume bieten zudem eine einfache Möglichkeit, Kabelkanäle oder auch Schüttungen innerhalb des tragenden Systems einzubringen, ohne den Deckenaufbau zusätzlich zu erhöhen. Das hier verwendete System *LIGNO Rippe Q3 - 169* besteht aus Einzelementen mit einer Breite von je  $62.5\text{ cm}$  (s. Abb. 2.7 und 2.8) und zwei an die Deckenöffnung angepassten Randstreifen. Die Höhe der Elemente beträgt  $16.9\text{ cm}$ , die Länge  $550\text{ cm}$ . Jedes Element besteht aus drei tragenden Rippen, die nach oben hin breiter werden, und einer durchgehenden Unterseite.



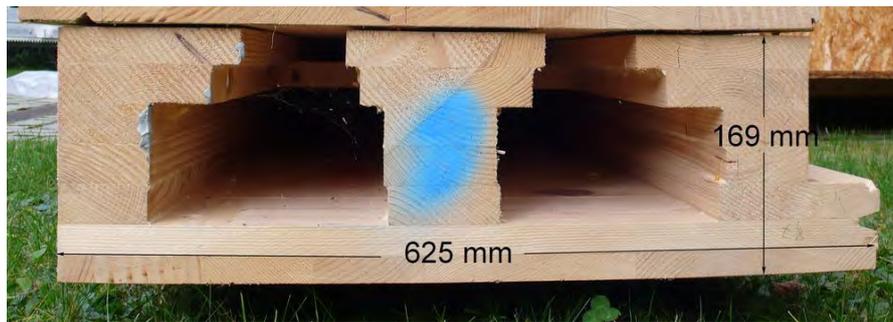
**Abbildung 2.4:** Balkenlage und Beplankung der Holzbalkendecke



**Abbildung 2.5:** Fertige Rohdecke der Holzbalkendecke mit Beplankung



**Abbildung 2.6:** Ansicht der fertigen Holzbalkendecke von unten.

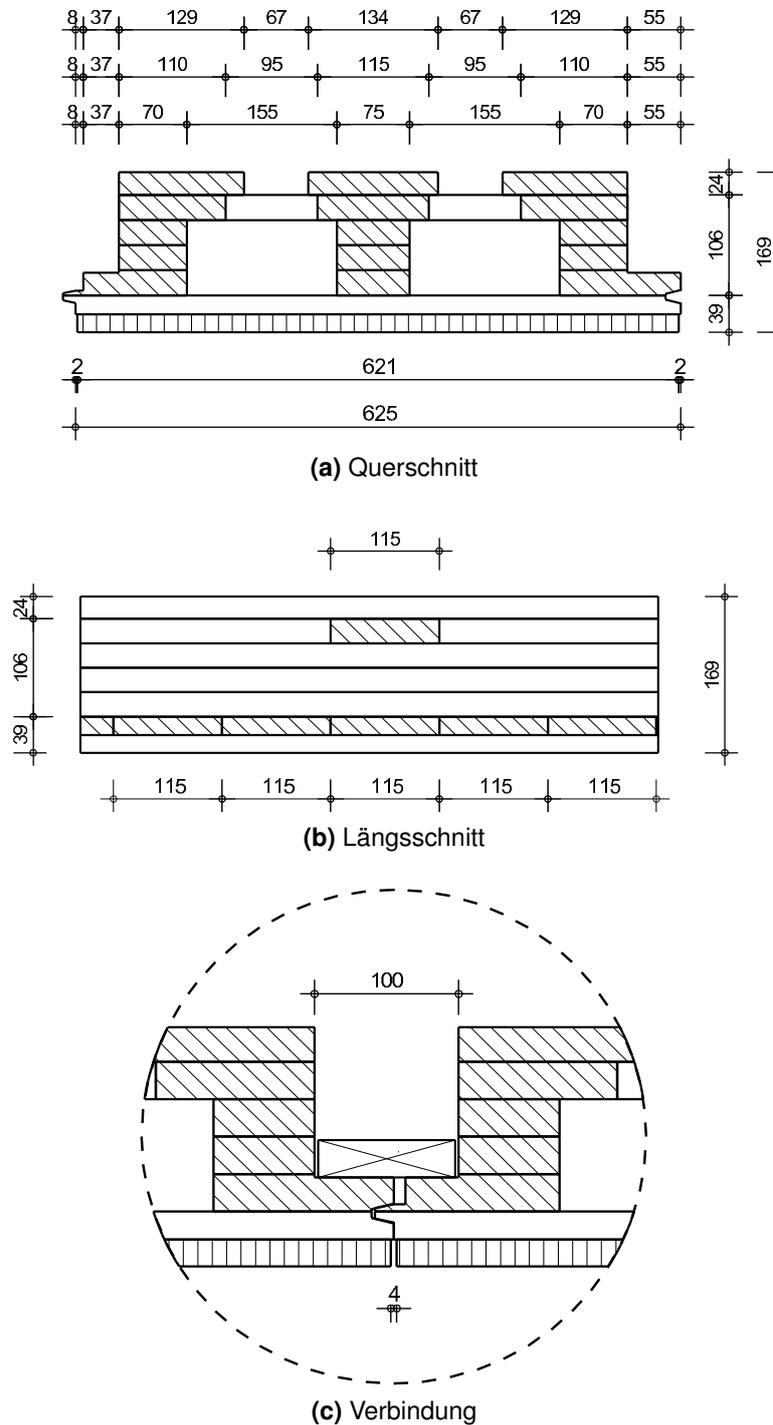


**Abbildung 2.7:** Sicht auf Stirnseite eines Lignotrend Hohlkastenträger Elementes

**Tabelle 2.4:** Masse und Rohdichte der Hohlkastenträgerelemente

|            | Masse<br><i>m</i> in <i>kg</i> | Rohdichte<br>$\rho$ in $kg/m^3$ |
|------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Element 1  | 143.3                          | 415.6                           |
| Element 2  | 159.7                          | 463.3                           |
| Element 3  | 159.3                          | 462.2                           |
| Element 4  | 164.9                          | 478.3                           |
| Element 5  | 154.6                          | 448.5                           |
| Element 6  | 157.2                          | 456.0                           |
| Element 7  | 164.6                          | 477.7                           |
| Element 8  | 156.7                          | 454.5                           |
| Element 9  | 151.4                          | 439.2                           |
| Mittelwert | $156.8 \pm 6.7$                | $455.0 \pm 19.4$                |

Die Unterseite der Decke ist in Sichtholzqualität als durchgehende Brettsperrholzlage gefertigt. Durch Nut-Feder-Verbindungen an der Unterseite können die Elemente bündig aneinander gestoßen werden. Die einzelnen Elemente werden durch Fichtenbretter ( $90\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ ) verbunden, welche über die Stoßfuge gelegt und alle  $30\text{ cm}$  auf beiden Seiten der Fuge verschraubt werden. Die Elemente werden aus Fichtenholz der Festigkeitsklasse C24 gefertigt und mit PUR Klebstoff verleimt. Die Decke ist unten in Sichtqualität ausgeführt, was eine weitere Behandlung aus optischen Gründen unnötig macht. Die Massen und die Rohdichte der einzelnen Elemente können Tabelle 2.4 entnommen werden. Die flächenbezogene Masse der Rohdecke beträgt:  $m' = 46\text{ kg/m}^2$ .



**Abbildung 2.8:** Querschnitte, Längsschnitt und Verbindung von Elementen LIGNO Rippe Q3 - 169 [33], Bemaßung in mm

## 2.2 Deckenaufbauten

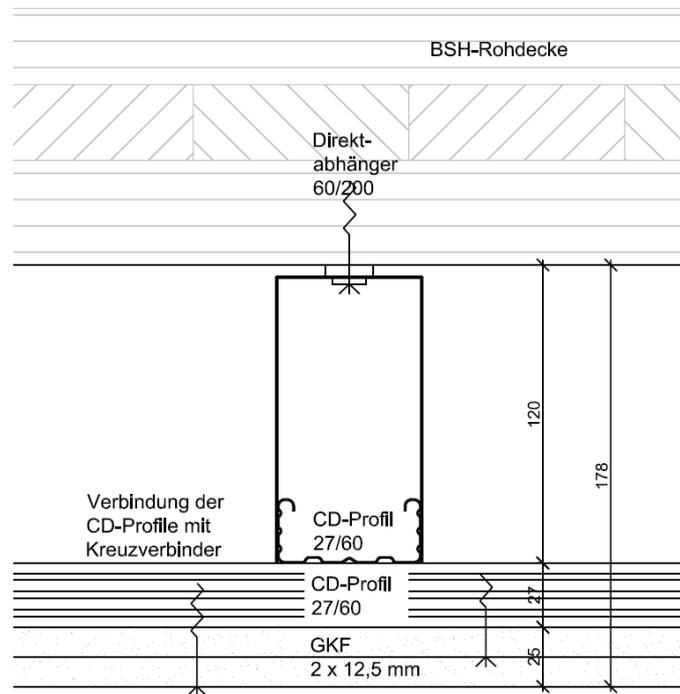
Zur Verbesserung der schwingungsdynamischen und akustischen Eigenschaften der Tragsysteme, werden diese durch Estrichaufbauten und abgehängte Deckensysteme erweitert. Hierzu stehen zwei Estrichsysteme der Firma Knauf Gips KG und ein Unterdeckensystem der Firma Vogl zur Verfügung.

### 2.2.1 Abgehängte Unterdecke

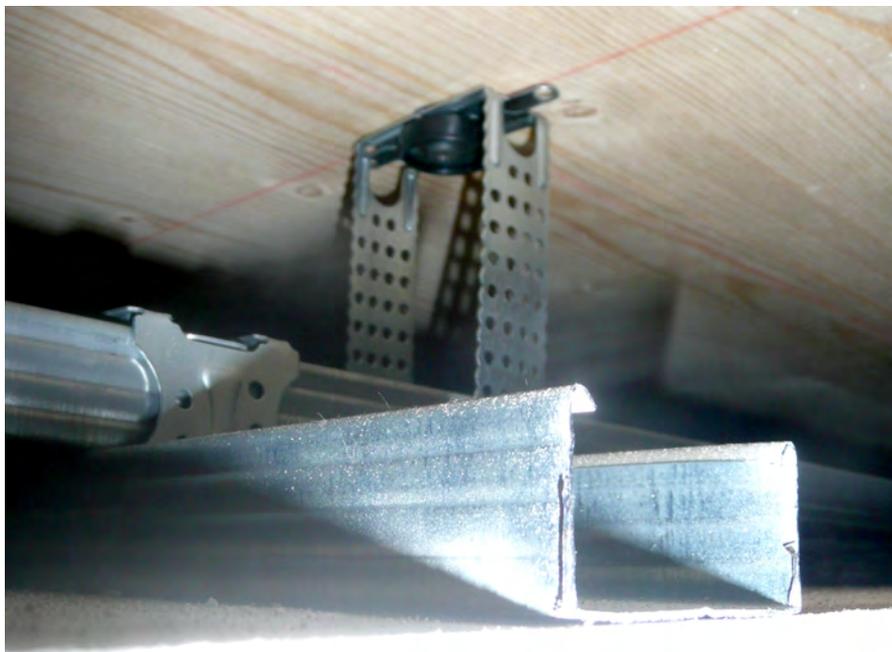
Bei der Konstruktion der abgehängten Unterdecke (UD) handelt es sich um eine doppelt mit Gipskartonplatten beplankte Decke mit einer Unterkonstruktion aus Metallprofilen. Diese besteht aus CD-Profilen (Querschnitt 60/27/0.6), die kreuzförmig über Direktschwingabhänger mit einer Länge von 120 mm mit der Rohdecke verbunden sind (s. Abb. 2.10, 2.11 und 2.12). Die Direktschwingabhänger sind in einem Raster von 95 cm x 100 cm unter der Brettsperrholz-Decke (s. Abb. 2.13) und im Raster von 75 cm x 98 cm unter der Holzbalkendecke (s. Abb. 2.14) angeordnet. Die Traglattung, an welcher die Gipskartonplatten befestigt sind, wird unterhalb mit Abständen von 50 cm angebracht. An diese Unterkonstruktion werden zwei Lagen Gipskartonplatten mit je 12.5 mm angeschraubt. Die beiden Lagen werden versetzt zueinander angeordnet, damit die Fugen nicht übereinander liegen. Zwischen den Rändern der Unterdecken und denen der Prüfstandsöffnung bleibt eine Fuge von ca. 10 mm Breite. Diese wird dauerelastisch mit Acryl verschlossen. Unterdecken werden im Rahmen dieses Vorhabens unter den Massivholzdecken und unter der Holzbalkendecke geprüft. Da die Hohlkastenträger eine fertige Unterseite mit Sichelholzoberfläche haben, wird hier keine abgehängte Unterdecke eingebaut. Die flächenbezogene Masse der Unterdeckenkonstruktion beträgt  $m' = 25 \text{ kg/m}^2$ .

### 2.2.2 Schwimmender Estrich

Durch das Einbringen eines Feder-Masse-Systems in Form eines schwimmenden Estrichs auf die Rohdecke wird die Trittschalldämmung einer Deckenkonstruktion deutlich verbessert. Gleichzeitig verursacht die erhöhte Masse auch ein Absinken der Eigenfrequenzen der Decke. Aus diesen Gründen werden im Rahmen des Forschungsprojektes zwei Estrichsysteme in Kombination mit den geprüften Decken näher untersucht.



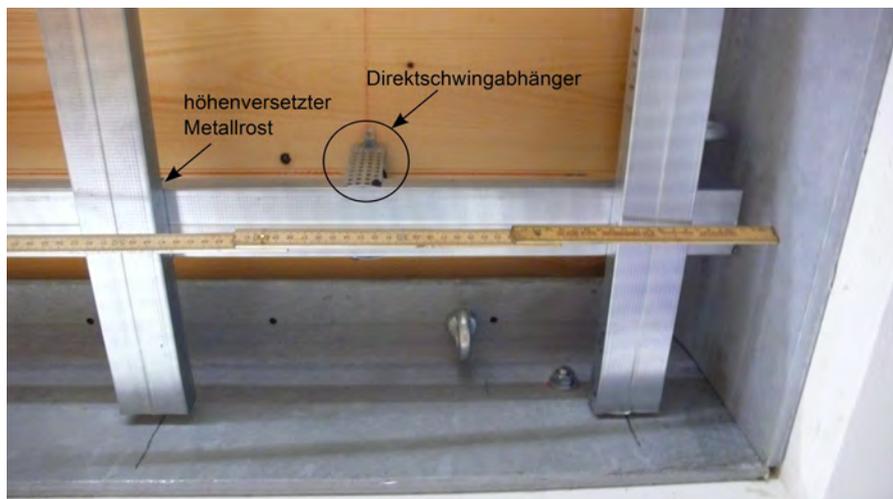
**Abbildung 2.9:** Unterkonstruktion der Brettsperrholz-Decke aus Direktschwingabhänger, Grundlattung, Traglattung und Beplankung



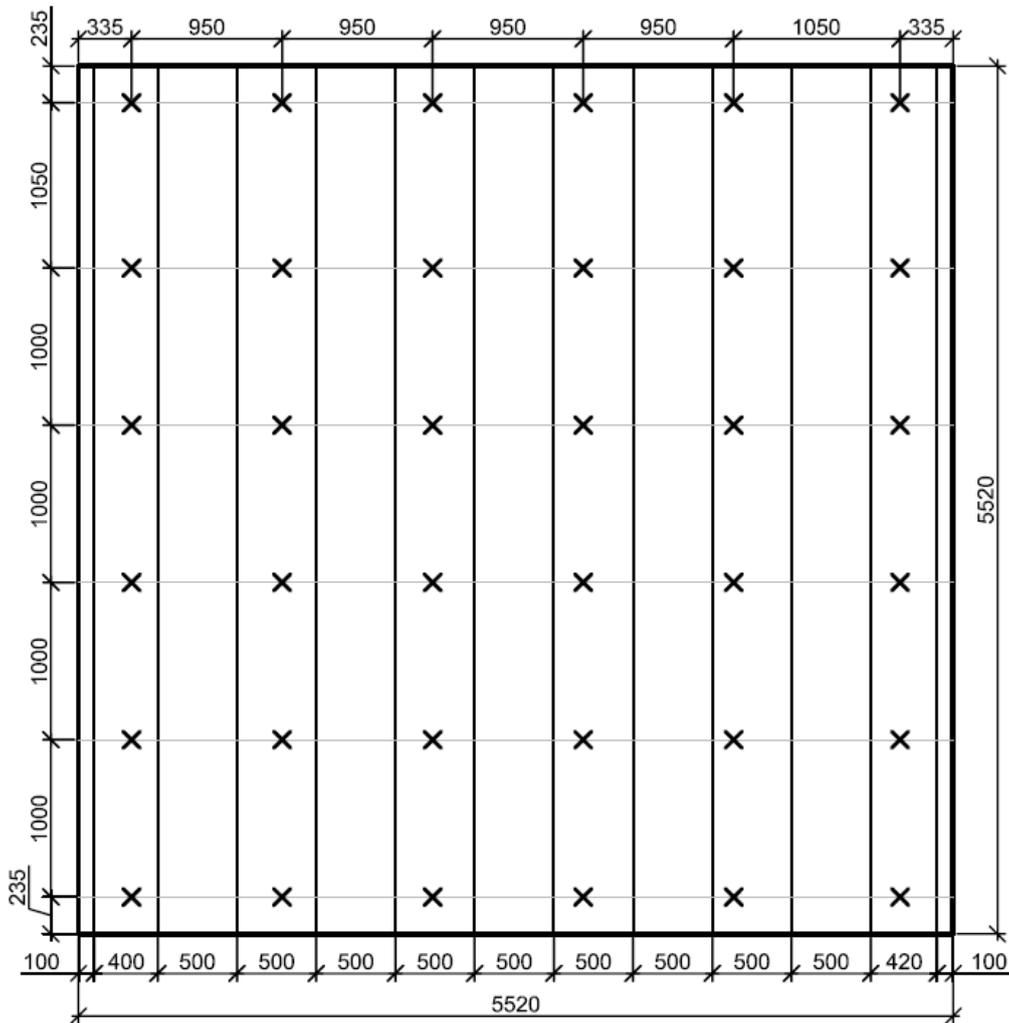
**Abbildung 2.10:** Blick in die Unterkonstruktion der abgehängten Gipskarton Decke



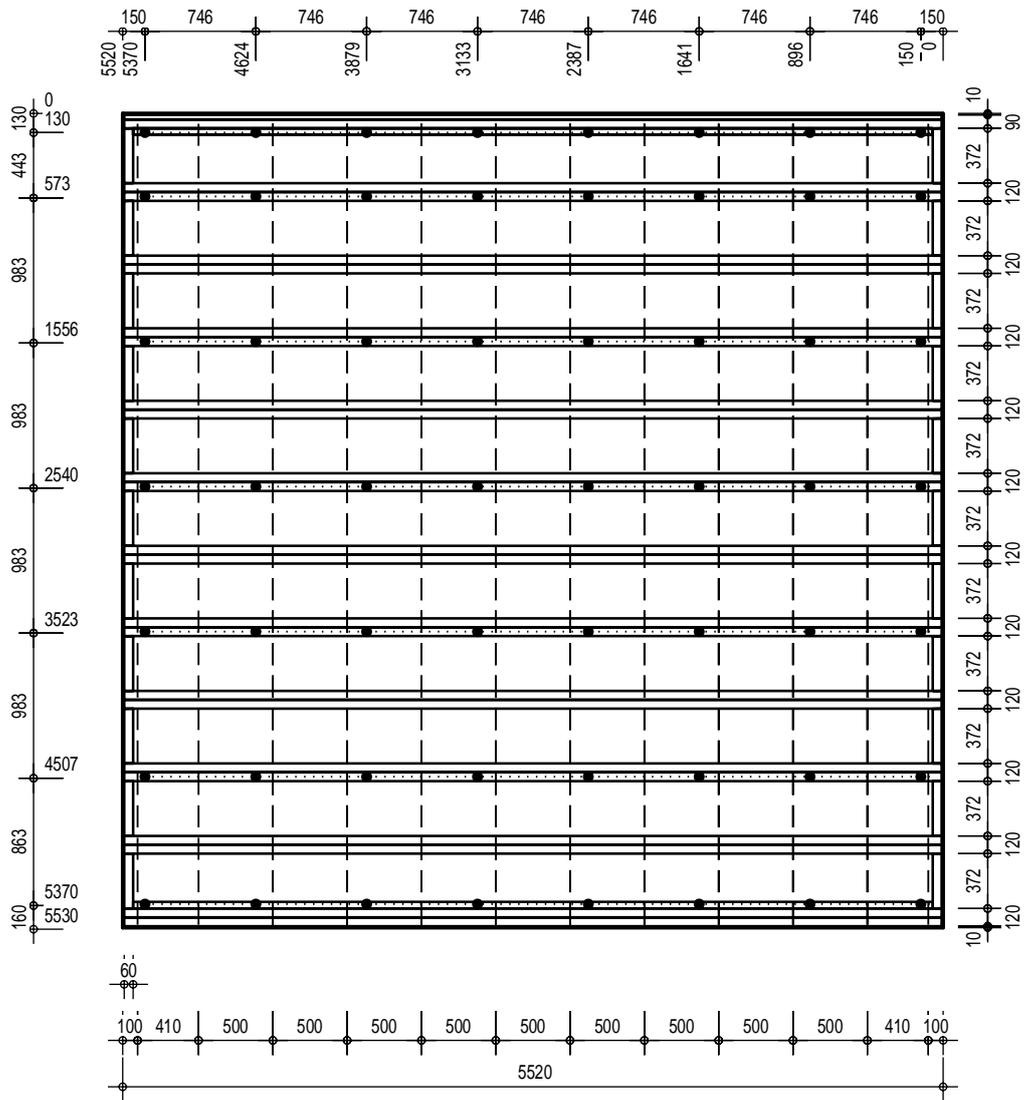
**Abbildung 2.11:** Unterkonstruktion der Unterdecke befestigt an Holzbalkendecke



**Abbildung 2.12:** Ausschnitt der Unterkonstruktion der Unterdecke mit Direktschwingabhänger und kreuzenden CD-Profilen



**Abbildung 2.13:** Darstellung der Unterdeckenkonstruktion unter der Brettsperrholz-Decke



**Abbildung 2.14:** Darstellung der Unterdeckenkonstruktion unter der Holzbalkendecke

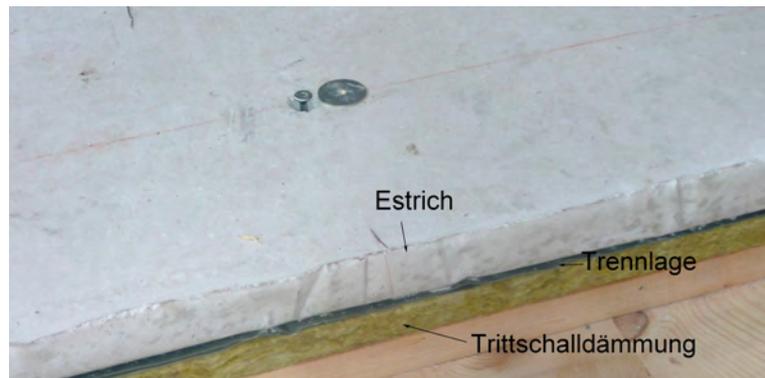


**Abbildung 2.15:** Fließestrich unmittelbar nach dem Einbringen

### 2.2.2.1 Fließestrich

Fließestriche werden meist flüssig auf einer Trittschalldämmung eingebracht und können dadurch Unebenheiten im Fußbodenaufbau ausgleichen. Im Vergleich zum Trockenestrich kann mit diesen Systemen auch mehr Masse eingebracht werden, was sich positiv auf die Reduzierung der Trittschallübertragung auswirkt.

Bei dem eingesetzten Fließestrich (FE) handelt es sich um einen Calciumsulfatestrich vom Typ FE50 der Firma Knauf Gips KG. Dieser wird mit einer Dicke von  $60 \text{ mm}$  eingebracht (s. Abb. 2.15 und 2.16). Der Estrich liegt auf einer Trittschalldämmmatte der Firma Heraklith vom Typ Heralan TP mit einer Stärke von  $20 \text{ mm}$  und einer dynamischen Steifigkeit von  $s' \leq 20 \text{ MN/m}^3$  [26]. Zwischen Dämmplatte und Estrich liegt eine PE-Folie als Trennschicht. Der getrocknete Estrich hat eine Rohdichte von ca.  $2000 \text{ kg/m}^3$  und eine Steifigkeit von ca.  $17 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$  [27]. Aus zeitlichen Gründen wird der Fließestrich lediglich auf eine Hälfte der Decke aus Leno162 aufgebracht. Auf der anderen Hälfte werden gleichzeitig Untersuchungen mit dem Trockenestrich durchgeführt. Die flächenbezogene Masse des Fließestrichs beträgt bei der hier geprüften Aufbauhöhe  $m'_{FE} = 100 \text{ kg/m}^2$ .

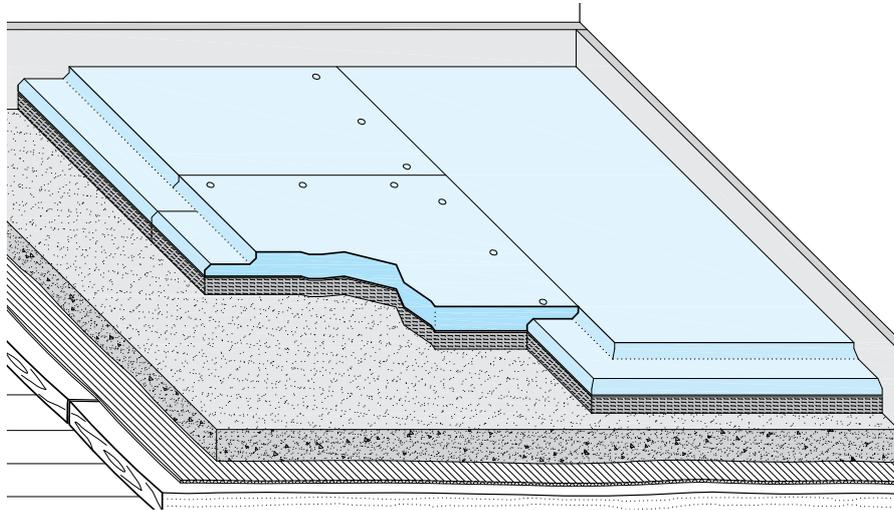


**Abbildung 2.16:** Calciumsulfat-Fließestrich mit Trittschalldämmung auf Massivholzdecke

### 2.2.2.2 Trockenestrich

Trockenestriche haben gegenüber Fließestrichen den Vorteil, dass sie einfacher eingebaut werden können, keine Trockenzeit benötigen und ein geringeres Gewicht einbringen.

Der Trockenestrich (TE) wird zum Einen auf einer Hälfte der Leno162 Decke eingebaut (auf der anderen Hälfte ist der Fließestrich eingebracht) und auf der Holzbalkendecke. Es handelt sich um ein Produkt der Firma Knauf vom Typ Brio18WF. Der Aufbau besteht aus einer 18 mm dicken Gipsfaserplatte an deren Unterseite ab Werk bereits eine 10 mm starke Holzweichfaserplatte angebracht ist. Die flächenbezogene Masse der Platten beträgt  $m' = 25 \text{ kg/m}^2$ . Die einzelnen Platten haben eine Breite von 60 cm und eine Länge von 120 cm. An den Rändern ist ein Stufenfalz eingefräst, welcher es ermöglicht, die Platten überlappend einzulegen. Im Bereich der Überlappung werden diese mit einem PUR-Klebstoff verbunden und zusätzlich alle 20 cm verschraubt.



**Abbildung 2.17:** Prinzipskizze zur Verlegung des Trockenestrichs mit Überlappung der Stufenfälze [28]



**Abbildung 2.18:** Trockenestrich (links) und Fließestrich (rechts) auf Leno162 Decke im Prüfstand

## 3 Experimentelle Untersuchungen

### 3.1 Beschreibung des Deckenprüfstandes

Der Deckenprüfstand des Labors für Schallmesstechnik (LaSM) befindet sich in dem im Jahr 2008 fertiggestellten Gebäude S der Hochschule Rosenheim (s. Abb. 3.1). Es handelt sich um einen Raum im Erdgeschoss des Gebäudes, in welchem die Decke zum Untergeschoss eine Öffnung von  $5.52\text{ m} \times 5.52\text{ m}$  aufweist (Grundrisse s. Abb. 3.2). An den Rändern dieser Öffnung sind umlaufend Stahlwinkel für die Auflagerung der zu messenden Konstruktionen angebracht (s. Abb. 3.3). Somit können in die Öffnung Decken mit einer Spannweite von  $5.50\text{ m}$  und einer maximalen Breite von ebenfalls  $5.50\text{ m}$  eingebaut werden. Bei einer quadratischen Konstruktion mit den Abmessungen  $5.50\text{ m} \times 5.50\text{ m}$  kann die Decke auch an allen vier Seiten aufgelagert werden. Durch eine große Türe zum Innenhof des Gebäudes können Elemente mit einer Länge von  $5.5\text{ m}$  bei einer maximalen Breite von  $1.9\text{ m}$  in einem Stück in den Prüfstand eingebracht werden. Oberhalb der Prüföffnung steht ein verfahrbares Kransystem mit einer maximalen Traglast von  $1000\text{ kg}$  zur Verfügung. Im Untergeschoss unterhalb der Prüföffnung steht ein Raum mit  $A \approx 48\text{ m}^2$  mit einer Höhe von  $h = 2.42\text{ m}$  bei einem Raumvolumen von  $V \approx 115.5\text{ m}^3$  zur Verfügung. Dort können sowohl Trittschallmessungen sowie Beschleunigungsmessungen an der Deckenunterseite zur Bestimmung der Schallschnelle durchgeführt werden. Durch Einbringen von Schallabsorptionsmaterial können Schallintensitätsmessungen zur Bestimmung der von der Decke abgestrahlten Schalleistung durchgeführt werden.

Zwischen dem EG und dem UG stehen ausreichend Messleitungen zur Nutzung von bis zu 32 Messkanälen zur Verfügung. Zur Vermeidung einer Schallübertagung über die flankierenden Wände sind diese mit umlaufenden Vorsatzschalen versehen.



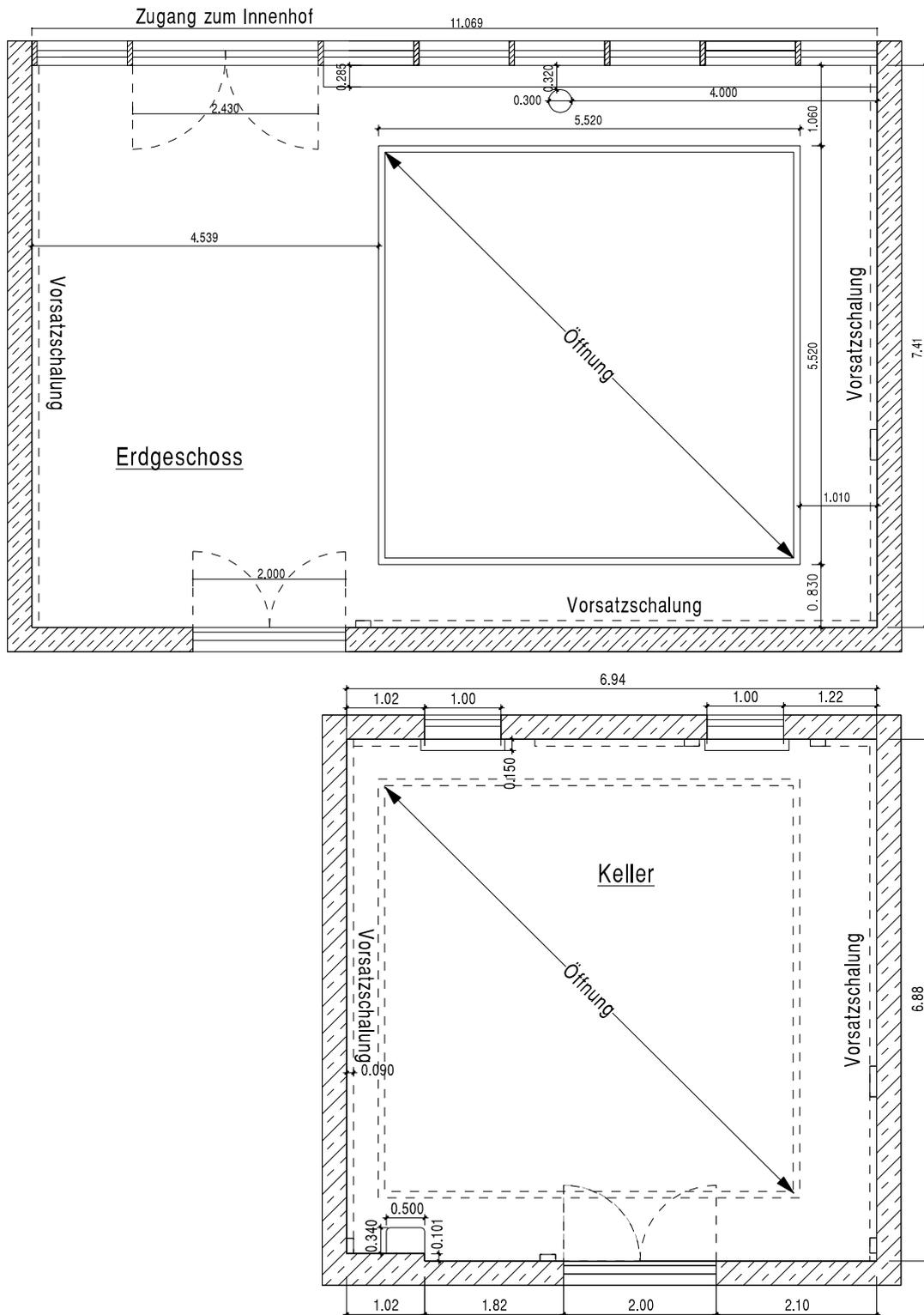
**Abbildung 3.1:** Aufnahme des oberen Raumes des Deckenprüfstandes

## 3.2 Messtechnik

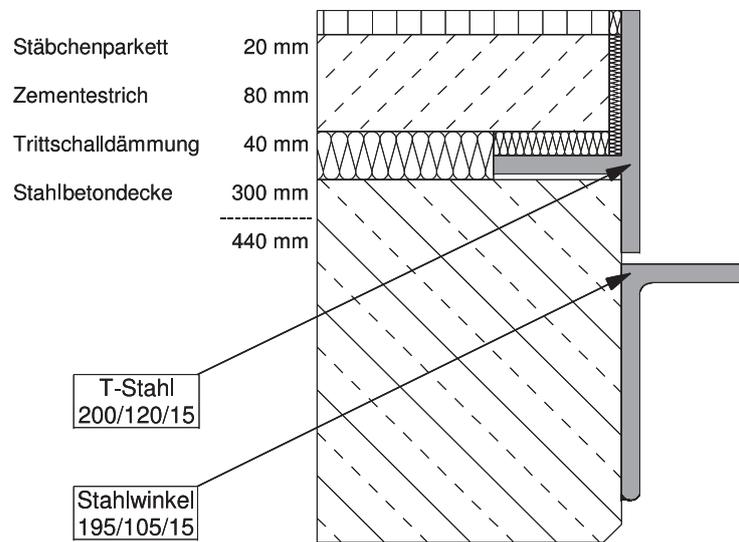
In diesem Kapitel werden die Geräte zur Anregung der Deckensysteme, die Messsensoren sowie die Datenaufnahme beschrieben.

### 3.2.1 Datenaufnahme

Als Datenaufnahmegerät steht ein Mehrkanalmesssystem der Firma Müller-BBM VibroAkustik-Systeme vom Typ MKII zur Verfügung. Dieses bietet die Möglichkeit, mittels bis zu acht Einsteckmodulen mit jeweils zwei oder vier Kanälen bis zu 32 Messsignale gleichzeitig aufzunehmen. Davon sind maximal 4 Mikrofoneingänge und 4 Eingänge für Ladungssensoren vorhanden. Alle 32 Messkanäle können auch zur Messung einfacher Spannungssignale verwendet werden, ebenso kann bei allen Kanälen eine IEPE/ICP Versorgung zugeschaltet werden. Das Messgerät wird über eine LAN-Verbindung mit einem Messrechner verbunden und über die Software *PAK*<sup>®</sup> angesteuert. Von den Messdaten können sowohl die Zeitrohdaten als auch verarbeitete



**Abbildung 3.2:** Grundrisse von Erdgeschoss und Untergeschoss des Deckenprüfstandes



**Abbildung 3.3:** Schnitt durch das Deckenauflager mit Befestigung der Stahlwinkel an der Stahlbeton-Rohdecke zwischen UG und EG der Laborräume

Daten (FFT, ntel-Oktaven, etc.) aufgenommen werden. Der Datenexport kann in verschiedene Formate erfolgen, wobei hier vorwiegend der Export nach MATLAB<sup>®</sup> genutzt wird.



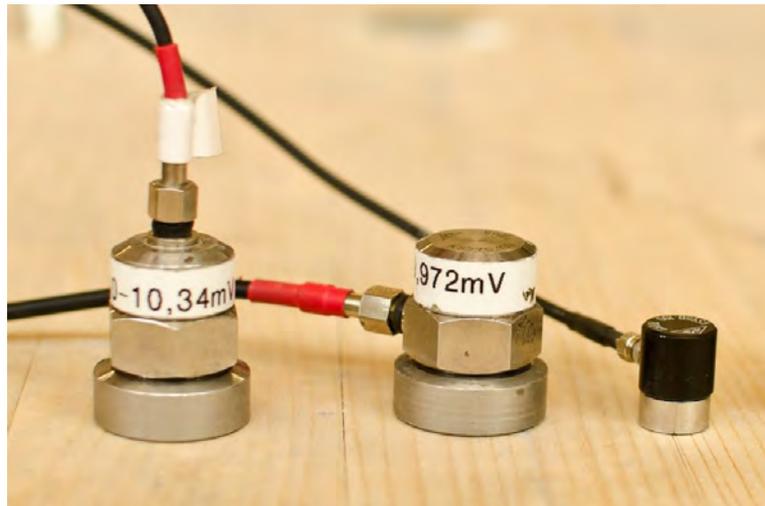
**Abbildung 3.4:** Mehrkanal-Messfrontend MBBM VibroAkustik Systems vom Typ MKII mit Anschlüssen für die einzelnen Sensoren

### 3.2.2 Sensoren

Zur dynamischen Messung werden vorwiegend Beschleunigungssensoren verwendet, welche mit einer ICP/IEPE Versorgung betrieben werden. Lediglich der Sensor zur Messung der mit dem Schwingerreger eingebrachten Kraft ist als Ladungssensor ausgelegt.

Bei den Beschleunigungssensoren handelt es sich um Sensoren der Firma MMF (Metra Mess und Frequenztechnik), welche alle eine Empfindlichkeit von ca. 100 mV/g aufweisen. Im speziellen wurden folgende Sensortypen verwendet:

- 10 Stück MMF KS76C-100
- 16 Stück MMF KS77C-100
- 4 Stück MMF KS95B-100



**Abbildung 3.5:** Beschleunigungsaufnehmer der Firma MMF von links nach rechts: Typ KS77C-100, KS76C-100 und KS95B-100

Bei dem Kraftaufnehmer handelt es sich ebenfalls um einen Sensor der Firma MMF vom Typ KF-24, welcher als Ladungsaufnehmer mit einer Empfindlichkeit von ca.  $350 \text{ pC/N}$  ausgeführt ist. Zur Vorverstärkung des Ladungssignals wurde zunächst das Ladungseingangsmodul CHG42S im MKII Messfrontend verwendet. Um eine höhere Eingangsdynamik zu ermöglichen, wurde im Laufe der Messungen zusätzlich ein externer Vorverstärker vom Typ M68 der Firma MMF eingesetzt (s. Abb. 3.6). Dieser bietet die Option, die Ladung am Eingang um den Faktor 10 zu reduzieren, wodurch sich der mögliche Messbereich von ca.  $\pm 30 \text{ N}$  auf ca.  $\pm 300 \text{ N}$  erweitert. Zur Messung wird die Ausgangsspannung des Ladungsverstärkers mit einem Spannungseingang des Messfrontends verbunden. Die Stromversorgung des Ladungsverstärkers erfolgt durch einen Bleiakku, um eine konstante, störungsfreie Stromversorgung zu gewährleisten.



**Abbildung 3.6:** Kraftsensor vom Typ KF24 mit Ladungsverstärker vom Typ M68

### 3.2.3 Modalhammer

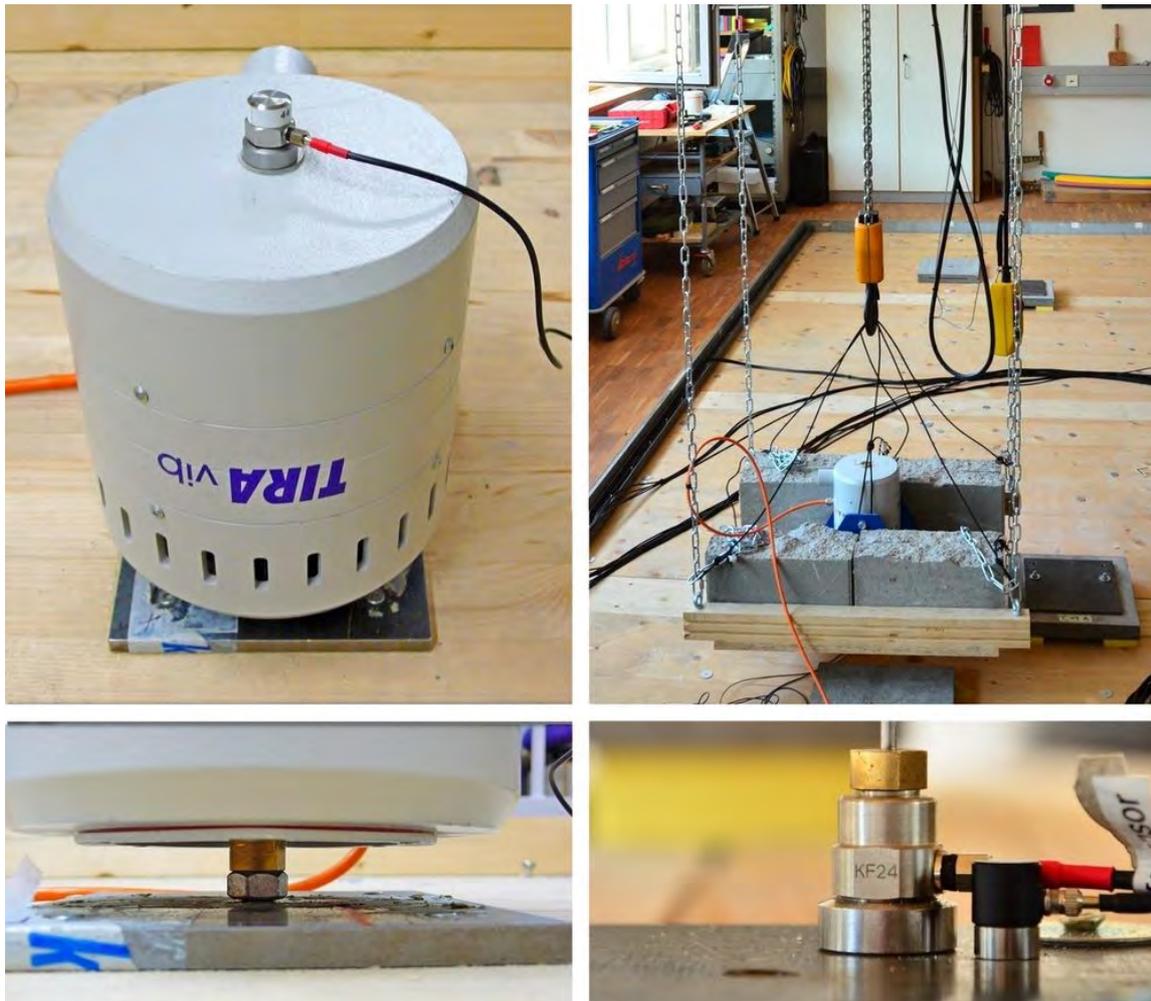
Für Modalanalysen durch Anregung mit einem Modalhammer stehen im Labor zwei unterschiedliche Geräte zur Verfügung (s. Abb. 3.7), ein kleiner Hammer der Firma Endevco vom Typ 2302-10 mit einer Kopfmasse von 100 g und ein größerer Hammer der Firma Endevco vom Typ 2304 mit einer Kopfmasse von ca. 1360 g. Die spannungsproportionalen Kraftsignale werden über eine Messleitung mit IEPE/ICP Versorgung vom Datenaufnahmesystem aufgezeichnet.



**Abbildung 3.7:** Zwei unterschiedliche Modalhämmer der Firma Endevco. Beide Hämmer haben auswechselbare Kontaktflächen unterschiedlicher Härte.

### 3.2.4 Schwingerreger

Zur Anregung steht neben den beiden Modalhämmern ein elektromagnetischer Schwingerreger der Firma Tira vom TypRV 51125-IN zur Verfügung. Der Shaker ist als Inertial- und Modalerreger einsetzbar (s. Abb. 3.8). Beim Betrieb als Inertialshaker wird der Schwingerreger direkt an die anzuregende Struktur angebracht und diese mit Hilfe der beschleunigten Masse des Schwingerregers angeregt. Beim Betrieb als Modalschwingerreger wird der Schwingerreger unabhängig von der zu messenden Struktur befestigt und mit dieser lediglich über einen dünnen Stahlstab (Stinger) verbunden. Die Länge des Stingers variiert hier je nach Aufhängung zwischen 10 cm und 20 cm bei einem Durchmesser von 2 mm. Durch die geringe Biegesteifigkeit des Stingers wird die Einleitung etwaiger Biegemomente aus Eigenschwingungen der Aufhängung des Schwingerregers auf die Struktur minimiert. Bei Verwendung als Modalerreger wird zur Bestimmung der eingebrachten Kraft die Beschleunigung des Schwingerregers gemessen und aus Masse und Beschleunigung die eingeleitete Kraft errechnet. Beim Modalerreger wird die über den Stinger eingeleitete Kraft mit Hilfe eines Kraftsensors gemessen. Mit dem hier verwendeten Schwingerreger können Kräfte von maximal 250 N bei sinusförmiger Anregung in die Struktur eingebracht werden. Der mögliche Frequenzbereich der Anregung liegt zwischen 0 Hz (konstante Gleichlast) und 2000 Hz. Der Schwingerreger wird über einen dazugehörigen Leistungsverstärker vom Typ BAA 500 der Firma Tira angesteuert. Die Signale zur Ansteuerung des Schwingerregers werden durch die Soundkarte des Messrechners ausgegeben.



**Abbildung 3.8:** Links: Schwingerreger montiert als Inertialerregere  
Rechts: Schwingerreger als Modalerregere, abgehängt am Kransystem des Labores  
Unten rechts: Kraftaufnehmer mit dem oben angebrachten Stößel und Beschleunigungsaufnehmer

### 3.2.5 Schallintensitätsmesssonde

Zur Messung der abgestrahlten Schalleistung steht eine Schallintensitätsmesssonde vom Typ Nor240 der Firma Norsonic zur Verfügung. Die Intensität wird punktwise unterhalb der Deckenaufbauten gemessen. Zur einfacheren Positionierung der Sonde steht ein Verfahrenssystem zur Verfügung, welches in x-, y- und z-Richtung bewegt werden kann (s. Abb. 3.10). Dabei wird in z-Richtung der Abstand der Sonde zur Decke und in x- und y-Richtung die Position der Sonde unter der Decke verstellt. Zur Bedämpfung des Raumes wird die gesamte Grundfläche



**Abbildung 3.9:** Zweimikrofonsonde (pp-Sonde) vom Typ Norsonic 240 mit einem 100 *mm* Spacer zwischen den beiden Kondensatormikrofonen.



**Abbildung 3.10:** Verfahrenssystem mit Befestigung der Intensitätssonde auf dem Verfahrenschlitten.



**Abbildung 3.11:** Empfangsraum mit Absorbermaterial zur Bedämpfung. Der Raum bleibt über die begehbaren Gitter voll zugänglich. Die Sonde ist so befestigt, dass die Mikrofone in horizontaler Richtung ca. 50 cm von dem Schlitten des Verfahrensystems entfernt sind.

mit Matten aus Polyesterfaservlies der Firma *CARUSO* ausgelegt (s. Abb. 3.11). Dies vermeidet Reflexionen zwischen der zu messenden Decke und dem Boden, welche zu Fehler in der Bestimmung der Intensität führen würden. Damit die Sonde leicht zugänglich und verstellbar bleibt, werden die Matten in 80 cm hohen Holzgestellen gestapelt, welche oben mit Stahlgittern abgedeckt werden. Zur Dämpfung von lateralen, stehenden Wellen werden weitere Absorbermatten an den Wänden des Empfangsraumes positioniert.

### 3.3 Auswertung

Zur Auswertung der Messungen werden die Übertragungsfunktionen zwischen dem Anregungspunkt und den einzelnen Messpunkten herangezogen. Daraus werden die Eigenfrequenzen näherungsweise bestimmt und Analysen der Schwingformen - Betriebsschwinganalyse (BSA) - erstellt.

### 3.3.1 Übertragungsfunktionen

Bei den Messungen werden zur Auswertung die Fouriertransformierten der Zeitdaten herangezogen. Aus diesen werden die komplexen Übertragungsfunktionen zwischen Anregungspunkt und den einzelnen Messpunkten gebildet. Bei den hier betrachteten Messungen werden die Quotienten aus der Beschleunigung am Messpunkt  $a_M$  und der Kraft am Anregungspunkt  $F_A$  gebildet. Dieses Verhältnis nennt man Akzeleranz [39].

$$H_{aF}(f) = \frac{a_M(f)}{F_A(f)} \quad \text{in} \quad \left( \frac{m/s^2}{N} \right) \quad (3.1)$$

Werden Kraft und Beschleunigung am selben Punkt gemessen, so wird dies im Folgenden als Eingangsakzeleranz bezeichnet. Bei unterschiedlichen Positionen von Kraft- und Beschleunigungsaufnehmer handelt es sich um eine Transferakzeleranz.

Das Verhältnis von anregender Kraft  $F_A$  zur Schnelle am Messpunkt  $v_M$  wird als Impedanz  $Z$  bezeichnet.

$$Z(f) = \frac{F_A(f)}{v_M(f)} \quad \text{in} \quad \left( \frac{N}{m/s} \right) \quad (3.2)$$

Im Folgenden wird, sofern nicht anders angegeben, der Betrag der Übertragungsfunktion betrachtet. Dieser berechnet sich aus den komplexen Daten folgendermaßen:

$$|H_{aF}(x,y,f)| = \sqrt{\Im H_{aF}(x,y,f)^2 + \Re H_{aF}(x,y,f)^2} \quad \text{in} \quad \left( \frac{m/s^2}{N} \right) \quad (3.3)$$

$\Im H_{aF}$  : Imaginärteil der komplexen Übertragungsfunktion

$\Re H_{aF}$  : Realteil der komplexen Übertragungsfunktion

Eine Rücktransformation der komplexen Übertragungsfunktion aus dem Frequenzbereich in den Zeitbereich ergibt die Einheitsimpulsantwort. Diese entspricht der Antwort auf einen idealen Impuls mit der Amplitude  $F_A = 1N$  über den gesamten Frequenzbereich.

Aus den komplexen Daten der Übertragungsfunktion kann die Phasendifferenz zwischen der anregenden Kraft und der Beschleunigung am Messpunkt bestimmt werden. Diese errechnet

sich aus dem Realteil und dem Imaginärteil der Übertragungsfunktion wie folgt:

$$\varphi(x,y,f) = \arctan \frac{\Re H_{aF}(x,y,f)}{\Im H_{aF}(x,y,f)} \quad \text{in (rad)} \quad (3.4)$$

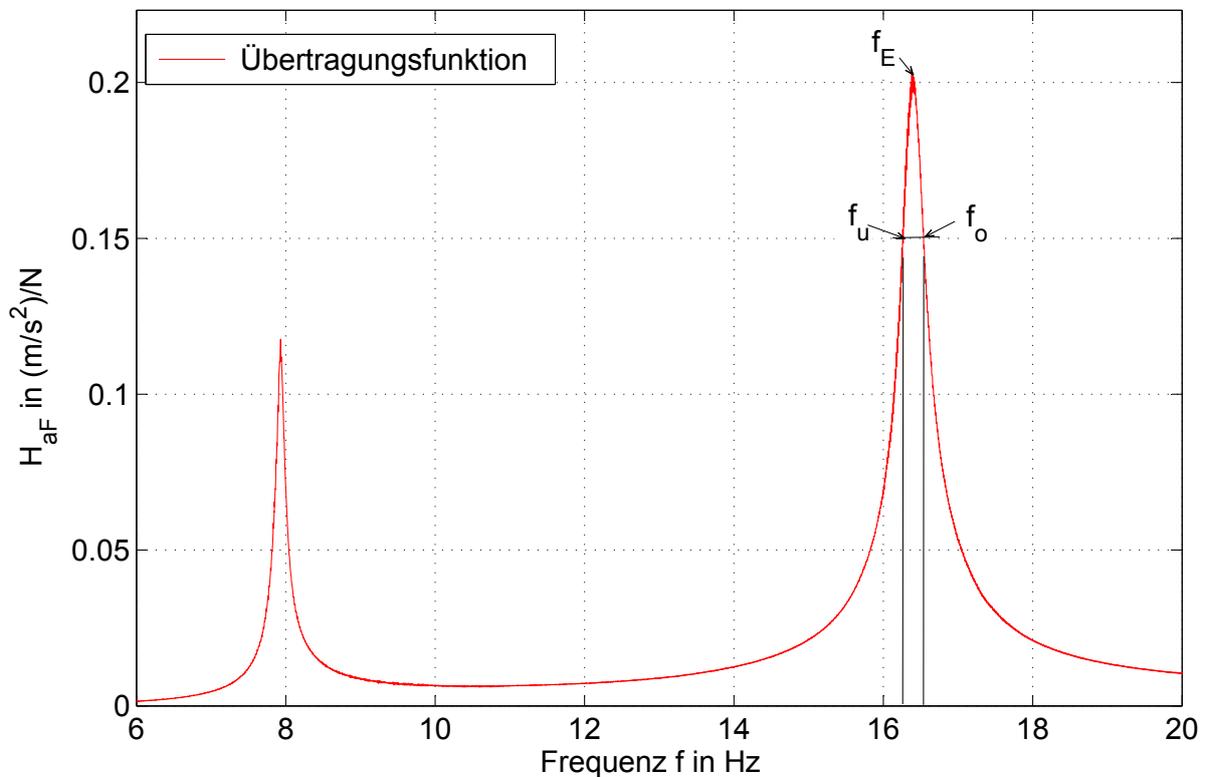
Aus dem spektralen Verlauf der Übertragungsfunktionen können einige dynamische Kennwerte der vermessenen Struktur abgelesen werden. Die Lage der Maxima im Betrag der Übertragungsfunktionen ergeben in guter Näherung die Eigenfrequenzen der untersuchten Struktur. Sind die Moden deutlich voneinander separiert, so kann durch Ablesen der Resonanzbreite bei einem Wert von  $H_{af}(f_E)/\sqrt{2}$  der Grad der kritischen Dämpfung  $D$  (auch Lehrsches Dämpfungsmaß) bei der entsprechenden Mode folgendermaßen bestimmt werden [61] (s. Abb. 3.12):

$$D = \frac{f_o - f_u}{2 \cdot f_E} \quad \text{o.E.} \quad (3.5)$$

$f_E$  : Eigenfrequenz der Struktur

$f_{u/o}$  : obere und untere Frequenz bei  $H_{af}(f_E)/\sqrt{2}$

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes hinsichtlich des Dämpfungsgrades ausgewerteten Messungen werden teilweise nach dieser Methode und teilweise mit dem Programm ME'SCOPE<sup>®</sup> der Firma Vibrant Technology durchgeführt [6]. Nach welcher Berechnungsmethode die Messungen ausgewertet werden wird in den entsprechenden Tabellen angemerkt.



**Abbildung 3.12:** Übertragungsfunktion eines Brettsperrholzelementes aus Leno105. Zu sehen sind die ersten zwei Eigenfrequenzen und die nötigen Punkte für die Berechnung des Grades der kritischen Dämpfung  $D$  aus der Halbwertsbreite bei der zweiten Eigenfrequenz.

### 3.3.2 Betriebsschwinganalyse

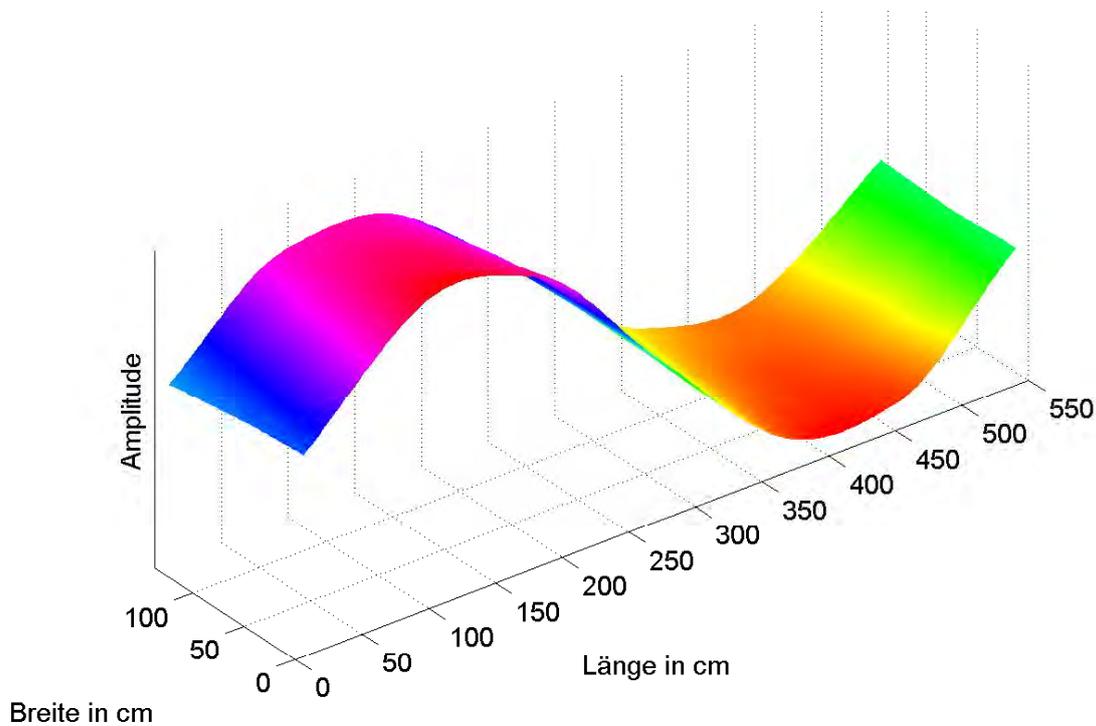
Aus den Übertragungsfunktionen  $H_{aF}$  vom Anregungspunkt zu den einzelnen Messpunkten werden Schwingungsbilder generiert, welche die Schwingform abhängig von der Erregerfrequenz darstellen. Dazu wird bei der zu betrachtenden Frequenz  $f$  der Imaginärteil der einzelnen Übertragungsfunktionen  $H_{aF}(x,y,f)$  an den Positionen  $P(x,y)$  punktweise dreidimensional dargestellt. Aus der Verbindung der einzelnen Punkte ergibt sich ein dreidimensionales Schwingungsbild der Struktur bei der betrachteten Frequenz. Von Interesse sind dabei vor allem die Eigenfrequenzen, welche in erster Näherung durch das Auffinden lokaler Maxima in der Über-

tragungsfunktion bestimmt werden.

$$A(x,y,f) = |H_{aF}(x,y,f)| \cdot \sin(\varphi(x,y,f)) = \Im H_{aF}(x,y,f) \quad \text{in} \quad \left(\frac{m/s^2}{N}\right) \quad (3.6)$$

$A$  : Amplitude für bildliche Darstellung der Schwingform

Ein Beispiel für die Betriebsschwinganalyse eines einzelnen Brettsperrholzelementes bei der dritten Eigenfrequenz ist in Abb. 3.13 zu finden.



**Abbildung 3.13:** Beispiel für die Betriebsschwinganalyse eines Brettsperrholzelementes vom Typ Leno162 (5.5 m x 1.37 m) bei der dritten Eigenfrequenz von  $f = 39.7 \text{ Hz}$

Zur Darstellung der Schwingungen als Film werden die Beträge der Übertragungsfunktionen um die jeweils dazugehörige Phase versetzt abgebildet und von Bild zu Bild um den Winkel  $2\pi \cdot f \cdot t$  solange verschoben, bis mindestens ein kompletter Schwingungsdurchgang bis  $t = T = \frac{1}{f}$

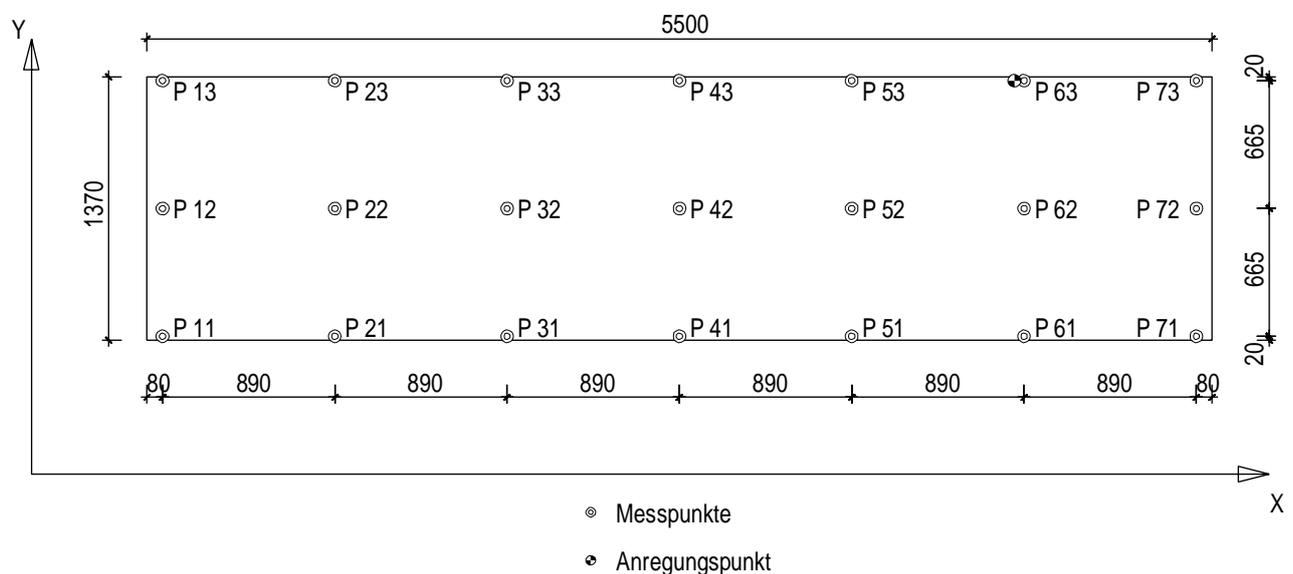
abgebildet ist. Durch Aneinanderreihen dieser Bilder zu einem Film ergibt sich eine bewegte Darstellung der Schwingung mit den richtigen Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Messpunkten.

$$A(x,y,f,t) = |H_{aF}(x,y,f)| \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi(H_{aF}(x,y,f))) \quad \text{in} \quad \left( \frac{m/s^2}{N} \right) \quad (3.7)$$

mit:  $t \in \left[ 0 \quad \frac{1}{f} \right]$

### 3.4 Anregung mit Schwingerreger

Die Untersuchungen wurden an vier Brettsperrholzelementen vom Typ Leno105 durchgeführt, welche in Kapitel 2 näher beschrieben sind. Um möglichst viele Eigenmoden der Elemente anzuregen, wird für die Untersuchungen eine Anregeposition gewählt, welche in y-Richtung (Querachse) direkt am Rand und in x-Richtung (Längsachse) nahe dem Auflager liegt. An der Position  $X = 4.51 \text{ m}$  und  $Y = 1.35 \text{ m}$  ist dies gegeben. In Abb. 3.14 ist die Position der Anregung und die Messpositionen für 7 x 3 Beschleunigungsaufnehmer dargestellt.



**Abbildung 3.14:** Positionsplan der 21 Beschleunigungsaufnehmer in 3 Reihen mit je 7 Aufnehmern. Positionsbezeichnung von P11 bis P73 (erste Ziffer entspricht der Position in X-Richtung, zweite der Position in Y-Richtung). Die Anregung ist neben P63.

### 3.4.1 Anregungssignale

Ziel der Untersuchungen ist die Generierung eines Anregungssignales, dessen spektral-temporale Charakteristik eine ausreichend lange Anregung pro Frequenzintervall bei einer vertretbaren Messdauer ergibt. Als Anregungssignal wurden hierfür ein linearer und logarithmischer Gleitsinus sowie Rosa Rauschen verwendet, die in Abb. 3.15 dargestellt sind. Das lineare Gleitsinus-Signal entspricht einem zeitgestuften Sinussignal (Stufensinus).

Der Anstieg der Frequenz als Funktion der Zeit für das Gleitsinus-Signal lässt sich wie folgt darstellen:

$$f_{lin}(t) = f_{min} + \left( \frac{f_{max} - f_{min}}{T} \right) \cdot t \quad \text{bei linearem Gleitsinus} \quad (3.8)$$

$$f_{log}(t) = f_{min} \cdot \left( \frac{f_{min}}{f_{max}} \right)^{\frac{t}{T}} \quad \text{bei logarithmischen Gleitsinus}$$

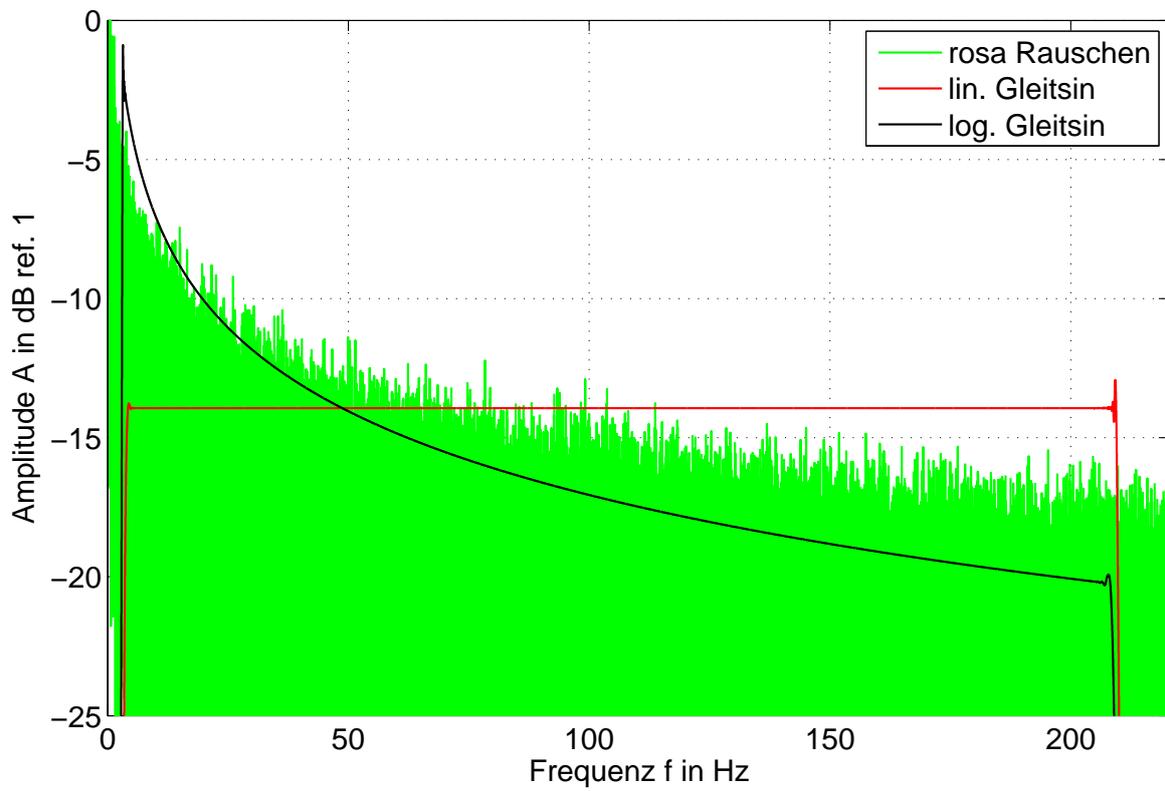
$f_{min}$  : Startfrequenz des Gleitsinus

$f_{max}$  : Stopffrequenz des Gleitsinus

$T$  : Dauer des Signales

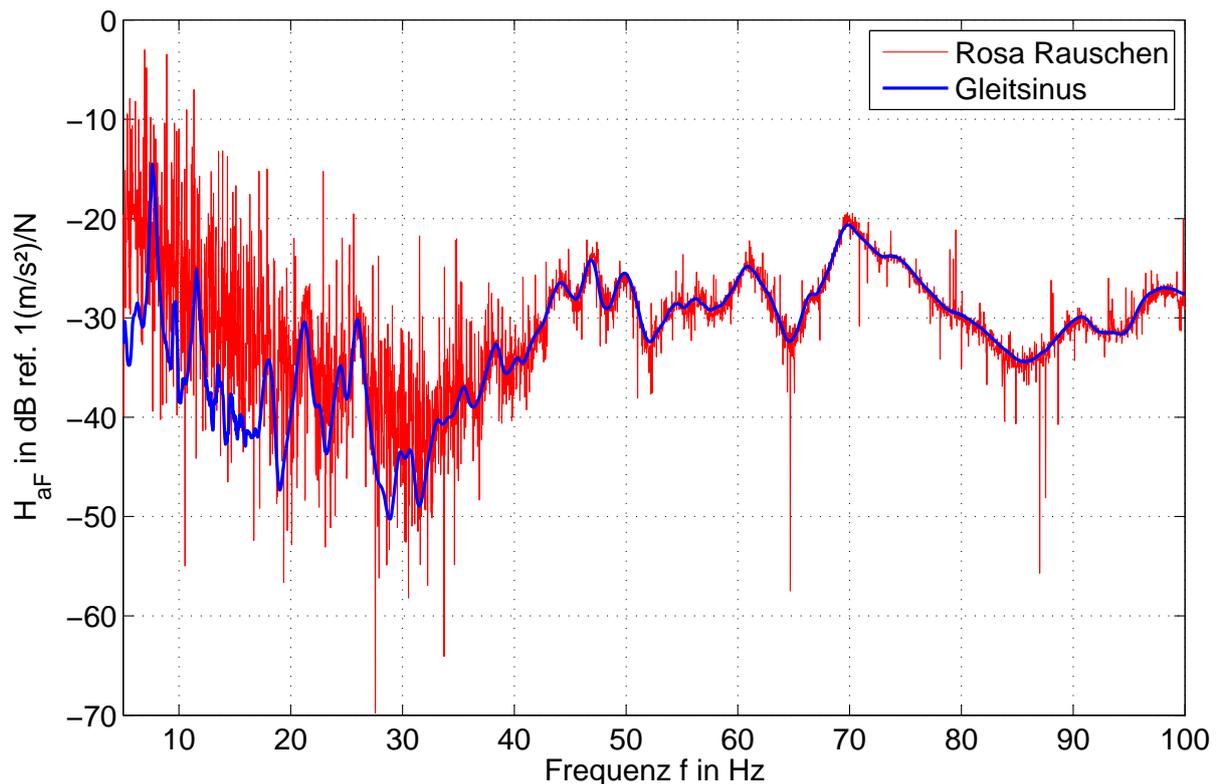
Bei dem logarithmischen Gleitsinus steigt die Frequenz über die Zeit exponentiell an, was eine deutlich längere Anregung der tiefen Frequenzbereiche zur Folge hat. Betrachtet man die Anzahl der Schwingungen pro Frequenzintervall, so werden beim logarithmischen Gleitsinus bei allen Frequenzen die gleiche Zahl an Schwingungsperioden angeregt.

Zur Ansteuerung des Schwingerregers wird der Audio-Ausgang des Messrechners verwendet. Es wird zuvor sichergestellt, dass die Soundkarte über den ganzen Frequenzbereich ein lineares Signal ausgibt und das zur Wiedergabe verwendete Programm keine Filterung im Frequenzbereich vornimmt. Mit Hilfe eines Musikwiedergabeprogrammes (z.B. VLC-Player) wird eine wav-Datei wiedergegeben, welche zuvor mit Hilfe eines entsprechenden MATLAB<sup>®</sup> Skriptes generiert wurde. Alternativ dazu kann zur Ausgabe des Anregungssignales das Messdatenaufnahmesystem *PAK* für die Anregung mit Rauschen und mit einem Stufensinus verwendet werden. Die Ausgabe eines Gleitsinus-Signals ist über *PAK* nicht möglich. Ein Vergleich zwischen der Anregung mit Rosa-Rauschen und einem linearen Gleitsinus ist in Abb. 3.16 dargestellt. Bei der Anregung mittels Rosa-Rauschen kann bei einer in der Bauakustik üblichen Terzmessung ei-



**Abbildung 3.15:** Vergleich der Frequenzspektren von logarithmischen Gleitsinus, linearem Gleitsinus und Rosa Rauschen

ne ausreichend gleichmäßige Anregung über alle Terzbänder erreicht werden. Da bei den hier beschriebenen Messungen eine Auflösung im Bereich von mindestens  $1/16 \text{ Hz}$  erreicht werden sollte, ist diese Art der Anregung jedoch nicht optimal, da zwischen den benachbarten Frequenzlinien teils erhebliche Amplitudenschwankungen im Bereich von  $\pm 10 \text{ dB}$  bestehen.



**Abbildung 3.16:** Vergleich der Eingangszakzeleranz am Anregungspunkt bei der Anregung mit einem Gleitsinus und mit Rosa-Rauschen

Aus dem Vergleich in Abb. 3.16 ist ersichtlich, dass sich durch die Anregung mit dem Gleitsinus deutlich rauschärmere Ergebnisse erzielen lassen als durch die Anregung mit Rosa-Rauschen. Deshalb wird im Folgenden auf eine stochastische Anregung (z.B. Rosa Rauschen) verzichtet. Da die Messung im Idealfall im eingeschwungenen Zustand erfolgen sollte, stellt der Stufensinus, bei dem jede zu messende Frequenz einzeln für die Dauer eines gesamten Messblocks angeregt wird, die optimale Anregung dar. Bei einer gewünschten Frequenzauflösung von  $\Delta f \leq \frac{1}{16} \text{ Hz}$  bedeutet dies allerdings, dass jeder einzelne Messblock eine Dauer von  $T_B \geq 16 \text{ s}$  hat. Demzufolge ist für eine Messung im Bereich von  $f_{min} = 3 \text{ Hz}$  bis  $f_{max} = 200 \text{ Hz}$  eine

Messdauer von mindestens

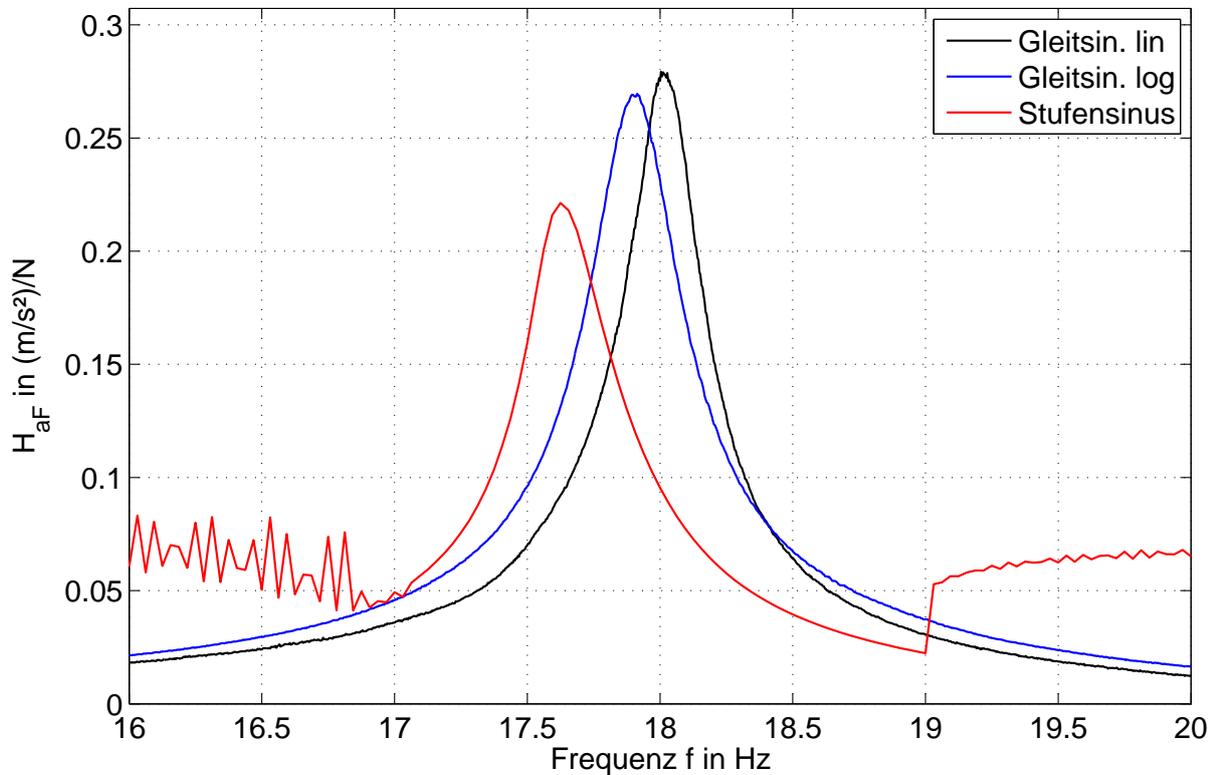
$$T_{gesmat} = T_B \cdot \frac{1}{\Delta f} \cdot (f_{min} - f_{max}) = 16s \cdot \frac{1}{\frac{1}{16}Hz} \cdot (200Hz - 3Hz) = 50432s$$

(ca. 14 h) erforderlich. Aus diesem Grunde wird der Stufensinus nur für sehr kleine Frequenzintervalle verwendet, um einen Vergleich zum Gleitsinus durchführen zu können. Abb. 3.17 zeigt einen Vergleich der Eingangszeleranz mit einer Frequenzauflösung von  $1/32 Hz$  bei einer Anregung der ersten Eigenfrequenz eines Leno105-Elementes (s. Kap. 2.1.1) mit einem Stufensinus und einem Gleitsinus.

Aufgrund der zu erwartenden Dämpfung des untersuchten Brettsperrholzelementes von ca.  $D = 2 \%$  und einer tiefsten Frequenz von  $f_{min} = 17 Hz$  wird eine Anregungsdauer von mindestens  $1.4 s$  nötig um eine Amplitude  $A(t)$  von  $95 \%$  der Amplitude im eingeschwungenen Zustand  $A_0$  zu erreichen. Diese konservative Abschätzung ergibt sich aus der homogenen Lösung der Differentialgleichung des gedämpften Einmassenschwingers aus [39]:

$$t = \frac{\ln\left(1 - \left(\frac{A(t)}{A_0}\right)\right)^{-1}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot D} \quad \text{in} \quad (s) \quad (3.9)$$

Für die Messung wird ein Stufensinus mit  $T_B = 32 s$  und einer einschwingzeit von  $T_{vor} = 4 s$  gewählt.



**Abbildung 3.17:** Vergleich der Eingangszakzeleranz am Anregungspunkt bei Anregung mit Stufensinus und Gleitsinus im Bereich der zweiten Eigenfrequenz.

Aus Abb. 3.17 geht hervor, dass bei der Anregung mit dem Stufensinus die Frequenz der zweiten Eigenmode um ca.  $0.4 \text{ Hz}$  ( $\cong 2.4 \%$ ) tiefer liegt als bei der Anregung mit dem linearem Gleitsinus. Eine weitere Messung wird mit einer Anregung durch einen logarithmischen Gleitsinus durchgeführt. Aus der Differenz der Ergebnisse zwischen logarithmischen und linearem Gleitsinus geht hervor, dass die längere Anregung der tiefen Frequenzen beim logarithmischen Gleitsinus der idealen Anregung mit dem Stufensinus am nächsten liegt.

Die Länge der einzelnen Messblöcke ist durch das Messgerät bzw. die dazugehörige Software *PAK* auf eine maximale Speichertiefe von  $2^{18}$  16-Bit-Werten beschränkt. Es soll bis zu einer Frequenz von  $f_{\max} = 200 \text{ Hz}$  gemessen werden. Dies bedeutet, dass bei dem im Messsystem fest vorgegebenen Tiefpassfilter eine Abtastrate von  $512 \text{ Hz}$  erforderlich ist. Daraus ergibt sich

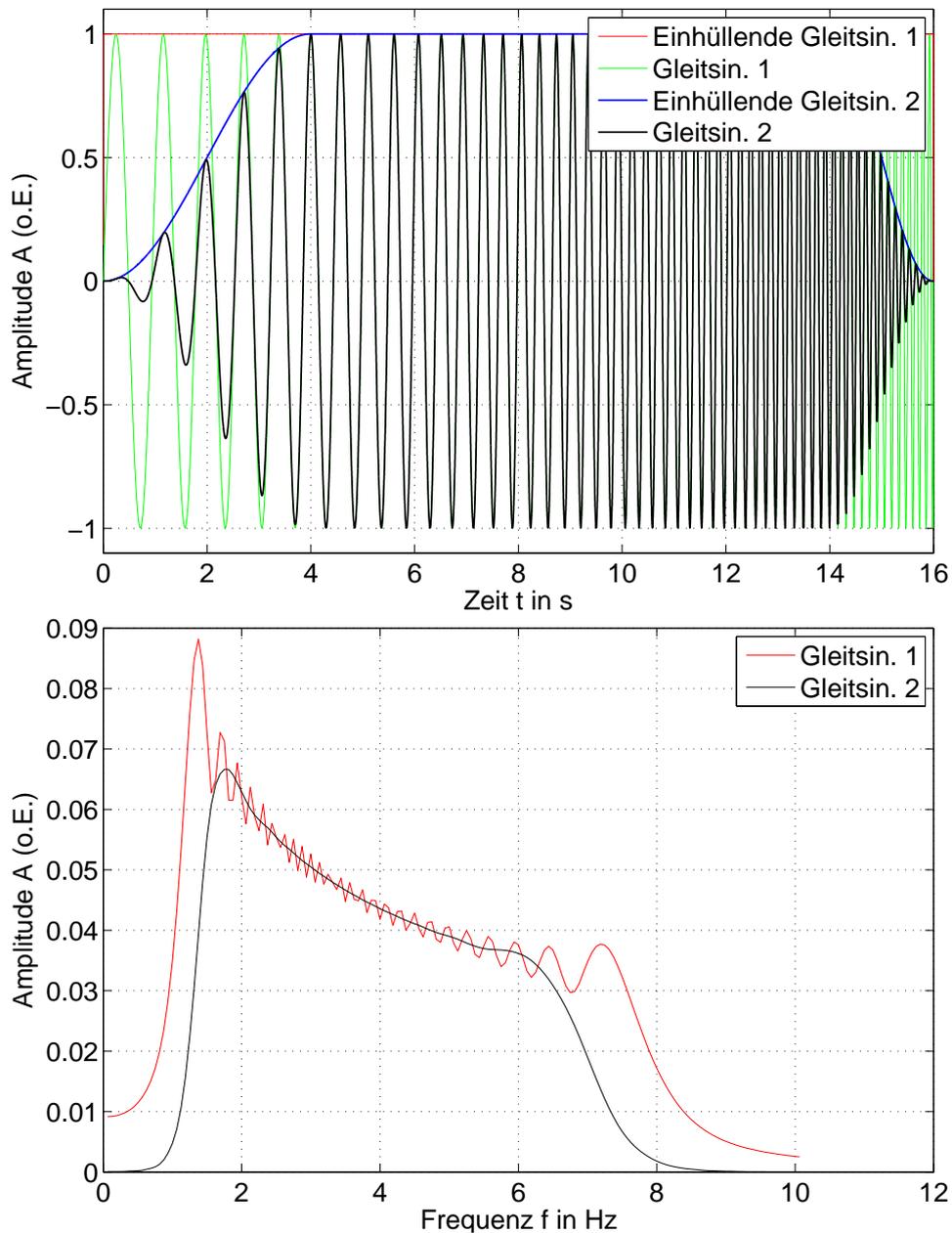
eine maximale Messdauer von:

$$T_{\max} = \frac{2^{18}}{512 \text{ Hz}} = 512 \text{ s}$$

Für die weiteren Untersuchungen wird deshalb ein logarithmischer Sweep mit einer Dauer von  $T = 512 \text{ s}$  in einem Frequenzbereich von  $3.0 \text{ Hz}$  bis  $210 \text{ Hz}$  verwendet. Die höchste Frequenz  $f_{\max} = 210 \text{ Hz}$  soll eine ausreichende Anregung bis zur höchsten gemessenen Frequenz von  $f_{\max} = 200 \text{ Hz}$  gewährleisten. Um in den Randbereichen des Frequenzbereiches die für einen Gleitsinus typischen Überhöhungen zu unterbinden, (s. Abb 3.18) wird das Signal zum Anfang für  $t_{\text{Beginn}} = 3.0 \text{ s}$  und am Ende für  $t_{\text{Ende}} = 1.0 \text{ s}$  geglättet. Der Verlauf dieser Glättung im zeitbereich wird wie folgt gewählt:

$$A_{\text{Beginn}}(t) = \frac{-\cos(t) + 1}{2} \quad t = [0 ; t_{\text{Beginn}}] \quad (3.10)$$

$$A_{\text{Ende}}(t) = \frac{\cos(t) + 1}{2} \quad t = [0 ; t_{\text{Ende}}] \quad (3.11)$$



**Abbildung 3.18:** Zeitsignal eines logarithmischen Gleitsinus mit einer Dauer von 16 Sekunden und einem Frequenzbereich von 1 Hz bis 8 Hz. Gleitsinus 1 ist dabei ohne Glättung und Gleitsinus 2 mit einer Glättung von 4 s am Beginn und 2 s am Ende. Die Auswirkung der Glättung im Zeitbereich ist im Frequenzspektrum (untere Abbildung) deutlich zu erkennen.

Da das Anregungssignal zu Beginn und Ende durch die Glättung die Amplitude null hat, können

die Zeitrohdaten direkt in den Frequenzbereich transformiert werden, ohne eine weitere Fensterung im Zeitbereich vorzunehmen.

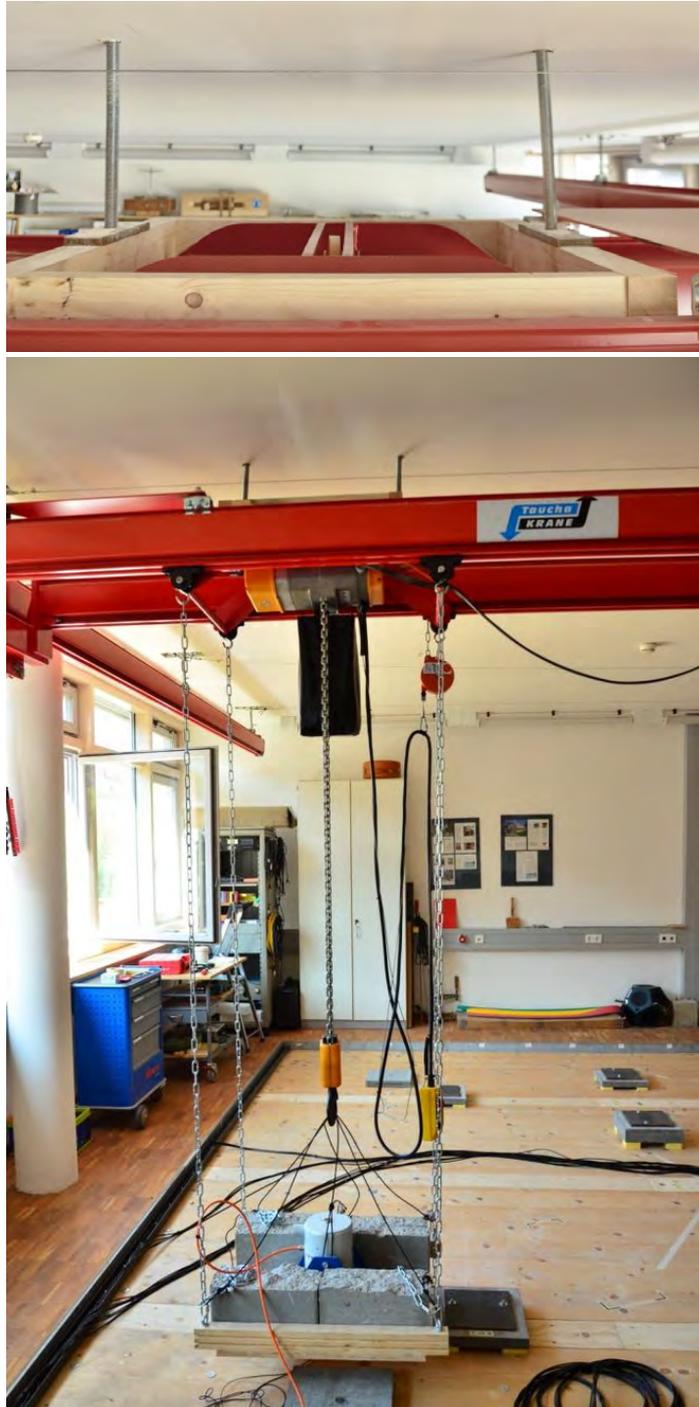
Aufgrund dieser Untersuchungen wird für alle folgenden Messungen mit Anregung durch den Schwingerreger ein logarithmischer Gleitsinus für einen Frequenzbereich von  $3 \text{ Hz}$  bis  $210 \text{ Hz}$  in einem Zeitblock von  $512 \text{ s}$  und einer Glättung gemäß den Gleichungen 3.10 und 3.11 verwendet.

### 3.4.2 Aufhängung

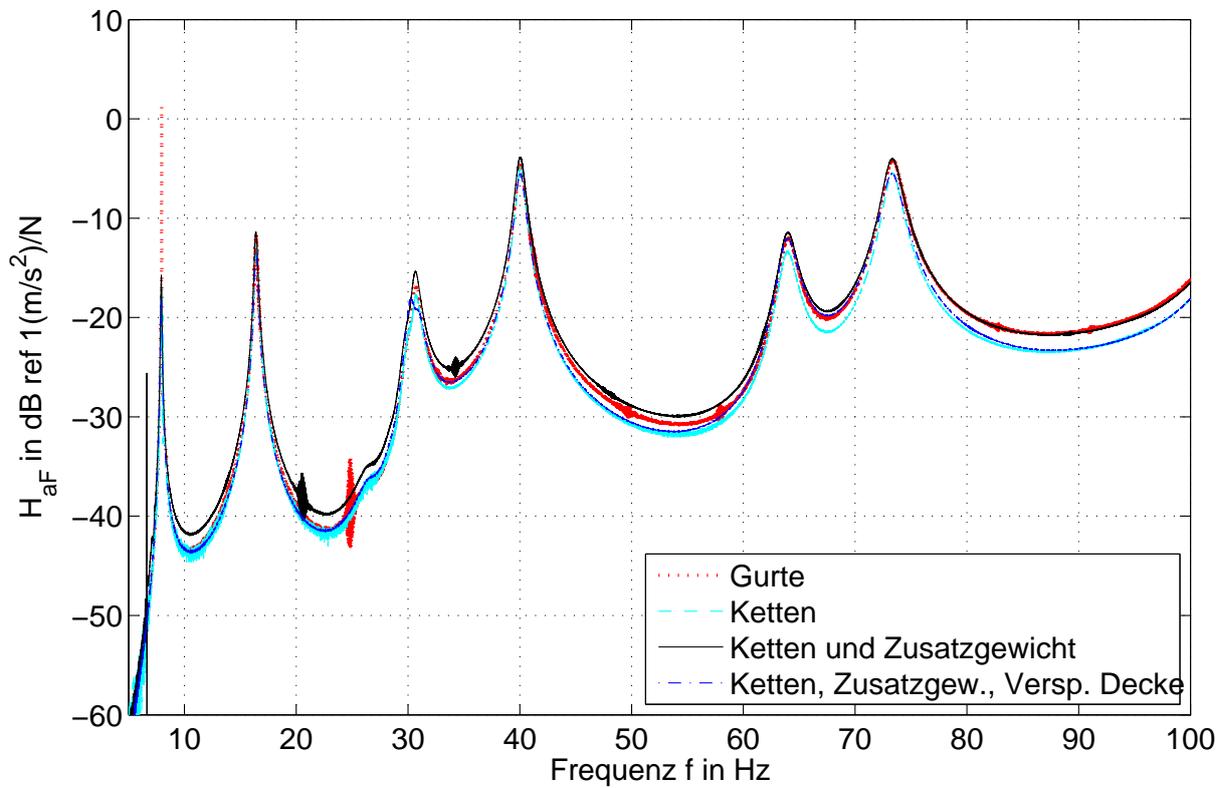
Der Schwingerreger wird zunächst mittels vier Spanngurten, welche eine stufenlose Höhenverstellung ermöglichen, vom Kran abgehängt. Erste Messungen zeigen, dass die gesamte Aufhängung im Bereich zwischen  $6 \text{ Hz}$  und  $40 \text{ Hz}$  mehrere Eigenresonanzen aufweist (s. Abb. 3.20). Diese sind zum Teil so stark, dass sie einen deutlichen Einfluss auf die gemessenen Übertragungsfunktionen haben. Um die tiefste Resonanz zunächst nach unten zu verstimmen, wird die gesamte Konstruktion mit Hilfe von acht Messinggewichten beschwert. Dadurch kann die am meisten störende Resonanz auf ca.  $4 \text{ Hz}$  nach unten verschoben werden. Da eine deutliche Federung des Gesamtsystems auf die Aufhängung mit Hilfe von handelsüblichen Spanngurten zurückzuführen ist, werden diese durch, in Längsrichtung, deutlich steifere Ketten ersetzt, welche direkt an den vier Ecken der Laufkatze des Kransystems abgehängt werden. (s. Abb. 3.19). Um weitere Einflüsse aus Biegeschwingungen der Krantraverse auszuschließen wird diese mit Hilfe von zwei M12 Gewindestangen gegen die Stahlbeton-Rohdecke verspreizt.

Abb. 3.21 zeigt die Eingangsakzeleranzen aus Abb. 3.20 nochmals im Bereich der ersten und der vierten Eigenmode des gemessenen Elementes. Hier werden die Einflüsse der unterschiedlichen Aufhängungen auf die verschiedenen Frequenzbereiche klar erkennbar. Im Bereich der ersten Eigenmode ist vor allem die Resonanzfrequenz der Quertraverse des Kransystems sehr dominant. Der Austausch der Gurte gegen Ketten hat deshalb geringen Einfluss auf das Ergebnis. Durch die zusätzliche Beschwerung kann die Resonanz der Aufhängung nach unten verschoben werden, was eine deutliche Resonanz bei ca.  $6.6 \text{ Hz}$  zur Folge hat. Erst durch die Verspannung gegen die Stahlbetondecke (s. Abb. 3.19) kann diese Eigenschwingung ausreichend minimiert werden. Im Bereich der vierten Resonanz bei ca.  $40 \text{ Hz}$  hat die Eigenschwingung des Kransystems keinen deutlichen Einfluss mehr. Die Aufhängung an Ketten hat in diesem Bereich einen deutlich weniger oszillierenden Verlauf der Übertragungsfunktion zur Folge. Ein Einfluss des zusätzlichen Gewichtes kann nur durch eine kleine Störung bei ca.  $34 \text{ Hz}$  erkannt werden. Diese wird jedoch durch die zusätzliche Verspreizung nach oben verhindert, was auf eine Re-

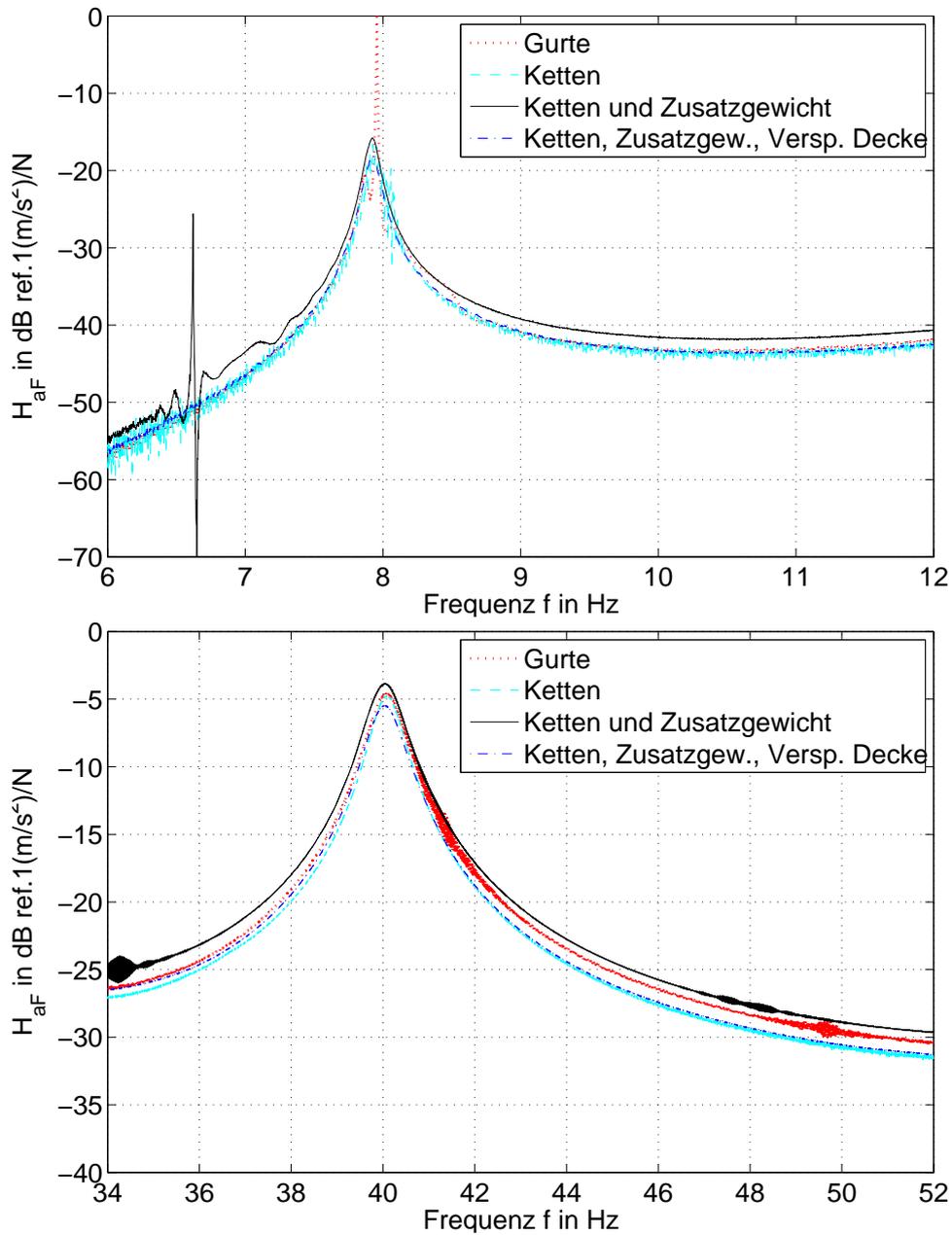
sonanz aus dem Kransystem hinweist.



**Abbildung 3.19:** Aufhängung des Schwingerregers an Ketten mit Zusatzgewicht neben dem Schingerreger und Verspreizung des Kransystems gegen die Decke (im Detail im oberen Bild)



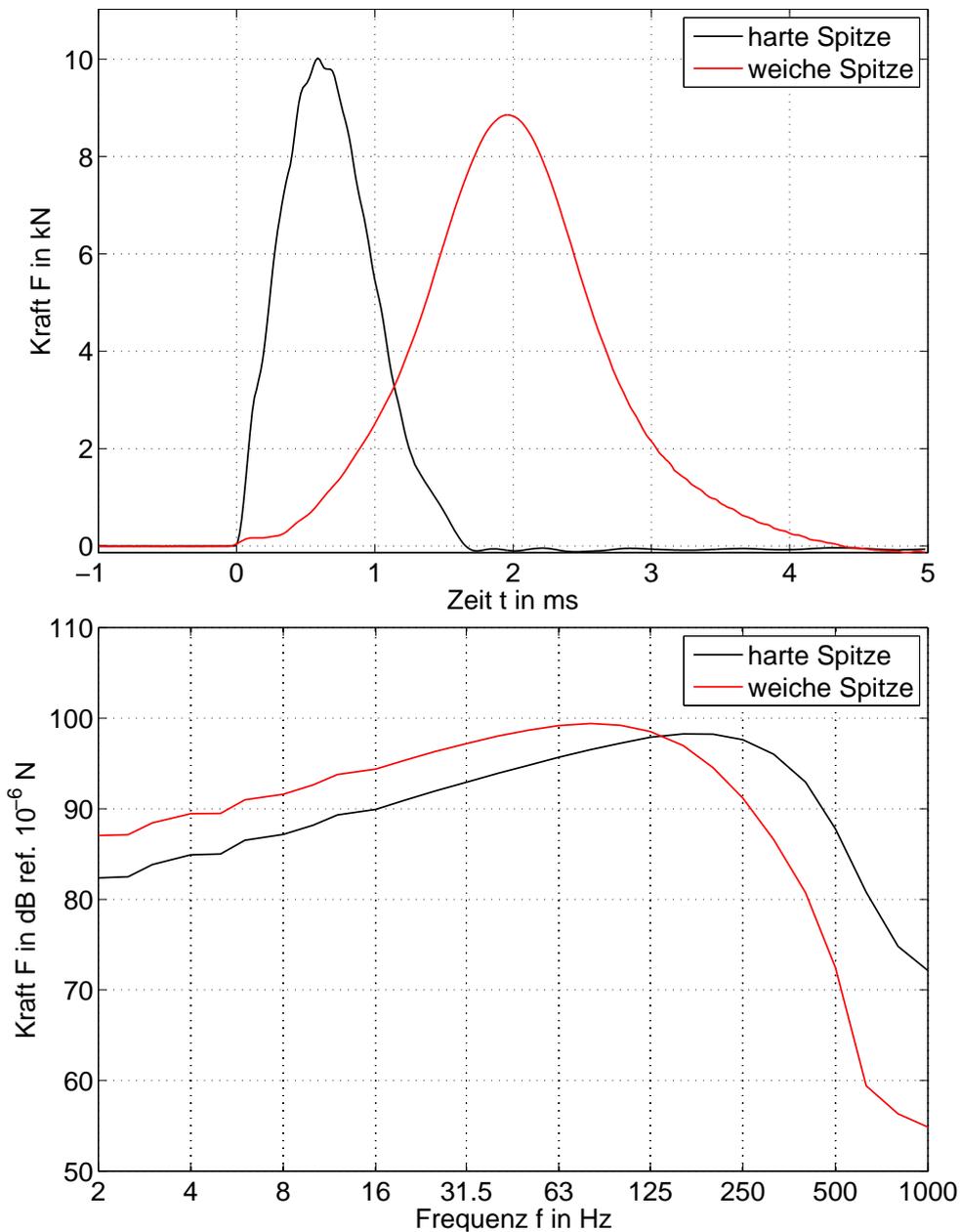
**Abbildung 3.20:** Eingangszkeleranzen des Leno105 Elementes bei unterschiedlichen Abhängungen des Schwingerregers



**Abbildung 3.21:** Eingangszkelerenzen des Leno105 Elementes im Bereich der ersten (bei ca. 8 Hz) und der vierten Eigenmode (bei ca. 40 Hz) bei unterschiedlichen Aufhängungen des Schwingerregers

## 3.5 Anregung mit Modalhammer

Neben der Anregung mit dem Schwingerreger soll auch die Anregung mit einem Modalhammer (s. Abb. 3.7) zur Ermittlung der Übertragungsfunktionen untersucht werden. Bei der Anregung mittels eines Hammers wird durch einen einzelnen Schlag auf die Struktur ein breiter Frequenzbereich angeregt. Abhängig von der Materialbeschaffenheit der Struktur und des Hammerkopfes variiert die Dauer des Stoßes und damit die spektrale Verteilung der eingebrachten Energie im Frequenzbereich. In Abb. 3.22 sind zwei Hammerschläge mit unterschiedlichen Spitzen im Zeit- und Frequenzbereich verglichen. Zur besseren Veranschaulichung wurde hierbei auf eine Stahlbetonwand mit einer sehr hohen Eingangsimpedanz geschlagen, wodurch der Einfluss der angeregten Struktur auf das Kraftspektrum minimal wird.



**Abbildung 3.22:** Vergleich zweier Hammerschläge mit weicher (EHM 1655) und harter Hammerspitze (EHM 1656) im Zeit- und Frequenzbereich. Der kürzere Impuls der harten Spitze hat ein breiteres Frequenzspektrum zur Folge. Mit der weicheren Spitze ist jedoch der spektrale Anteil bei tieferen Frequenzen höher.

Bei der Messung der gesamten Struktur kann entweder eine Anregungsposition (Modalhammer) in Kombination mit mehreren Empfangspositionen (Beschleunigungsaufnehmer) gewählt

werden oder es wird nur an einer Empfangsposition die Beschleunigung gemessen und an allen anderen Empfangspositionen gemäß dem ersten Vorgehen mit dem Hammer angeregt. Die Berechnung der Übertragungsfunktion ist unabhängig von der Vorgehensweise, da das Reziprozitätsprinzip gilt.

Bei der Durchführung einer Betriebsschwinganalyse des Testelements wird die Beschleunigung an 7x3 Positionen gleichzeitig mit 21 Beschleunigungssensoren gemessen (s. Abb. 3.14). Es wird immer an der gleichen Position angeregt und diese Anregung mehrfach wiederholt, um Abweichungen zwischen den einzelnen Schlägen durch eine anschließende Mittelwertbildung aller Übertragungsfunktionen auszugleichen. Die Methode der Hammermessung hat im Vergleich zur Anregung mit dem Schwingerreger den Vorteil, deutlich weniger Zeit in Anspruch zu nehmen, benötigt jedoch ein Messsystem mit ausreichend vielen Kanälen.

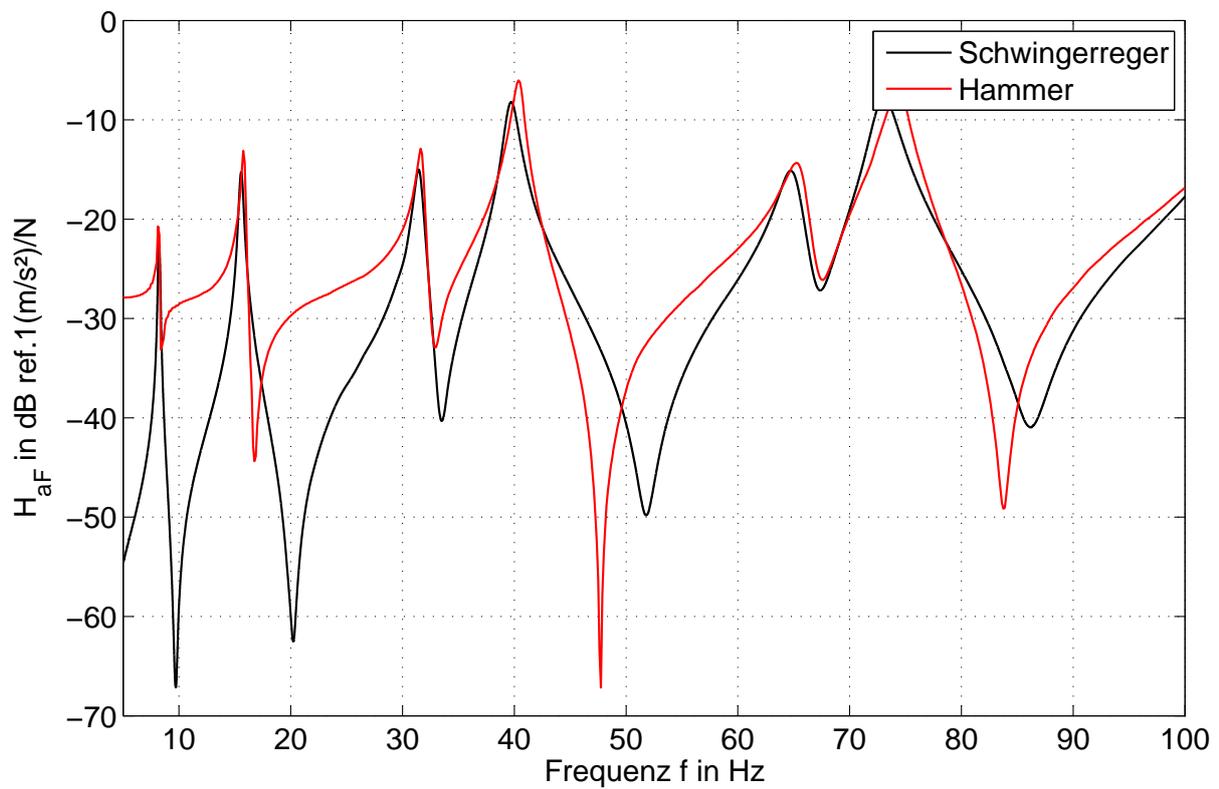
Ein Vergleich der Übertragungsfunktionen beider Messmethoden zeigt, dass diese im Bereich der Eigenschwingungen bei beiden Anregungen gut vergleichbar sind. Lediglich zwischen den Resonanzfrequenzen weichen die beiden Übertragungsfunktionen deutlich voneinander ab (s. Abb. 3.23). Die Hammermessung hat allerdings den Nachteil der deutlich schlechteren Wiederholbarkeit der einzelnen Teilmessungen. Des Weiteren darf die Decke bei der Messung nicht von der messenden Person betreten werden um eine Verfälschung der Ergebnisse durch die zusätzliche Masse zu vermeiden. Deshalb wird diese Methode im Folgenden nur für Messungen an einzelnen Elementen der Deckensysteme angewendet wenn eine Positionierung des Schwingerregers über allen einzelnen Elementen nicht möglich ist.

## 3.6 Auflagerung der Deckenkonstruktionen

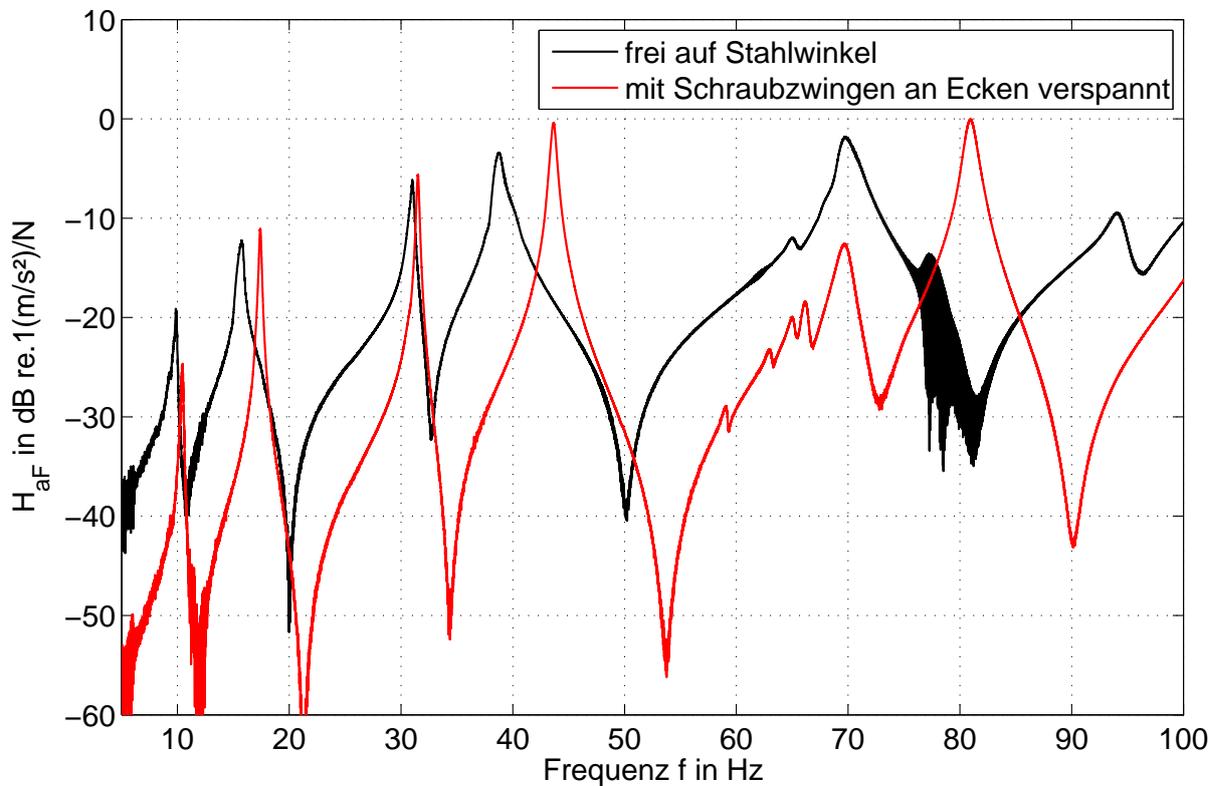
Zur Auflagerung der Decken sind im Labor die bereits in Kapitel 3.1 auf Seite 50 beschriebenen Stahlwinkel zur Verfügung. Neben der direkten Auflagerung auf den Stahlwinkeln soll auch eine gelenkige Auflagerung und die Lagerung auf einem Elastomer untersucht werden.

### 3.6.1 Auflagerung direkt auf Stahlwinkeln

Erste Messungen der geprüften Elemente zeigen, dass die im Prüfstand vorhandenen Stahlwinkel nur bedingt zur direkten Auflagerung der Elemente geeignet sind. Durch die Verformung der Elemente auf Grund ihres Eigengewichtes liegen diese lediglich auf der Vorderkante der



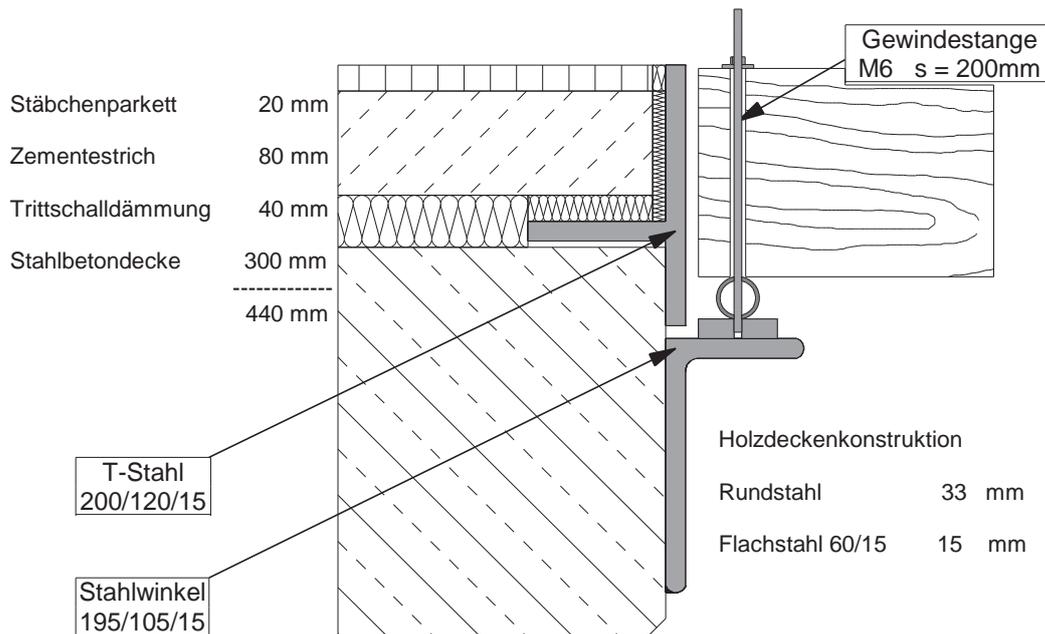
**Abbildung 3.23:** Vergleich der Eingangszakzeleranz eines Leno105 Elementes bei der Anregung mit einem Modalhammer bzw. mit einem Schwingerreger. Beide Messungen wurden je fünf mal wiederholt und gemittelt.



**Abbildung 3.24:** Übertragungsfunktion mit und ohne Verspannung der Ecken auf die Auflagerwinkel. Deutliche Abweichungen sind vor allem bei den Torsionsmoden bei ca. 15 Hz und 40 Hz zu erkennen.

Winkel auf. Des Weiteren können die Elemente bei Torsionsschwingungen an den Ecken abheben. Aus diesem Grund werden die Ecken der Elemente mit Hilfe von Schraubzwingen auf die Auflagerwinkel verspannt. Die Eingangssakzeleranzen in Abb. 3.24 zeigen, dass diese Verspannung deutliche Auswirkungen auf die Lage der ersten beiden Torsionsmoden bei ca. 18 Hz und ca. 43 Hz hat. Durch die Verspannung am Auflager wird für Torsionsschwingungen eine Zwangsbedingung (in Form einer Knotenlinie) geschaffen die eine Erhöhung der dazugehörigen Eigenfrequenzen zur Folge hat.

Da das Messergebnis noch nicht den Erwartungen hinsichtlich eines gleichmässigen Verlaufes und auch nicht den Ergebnissen der FEM-Simulation entspricht, werden weitere Varianten untersucht.

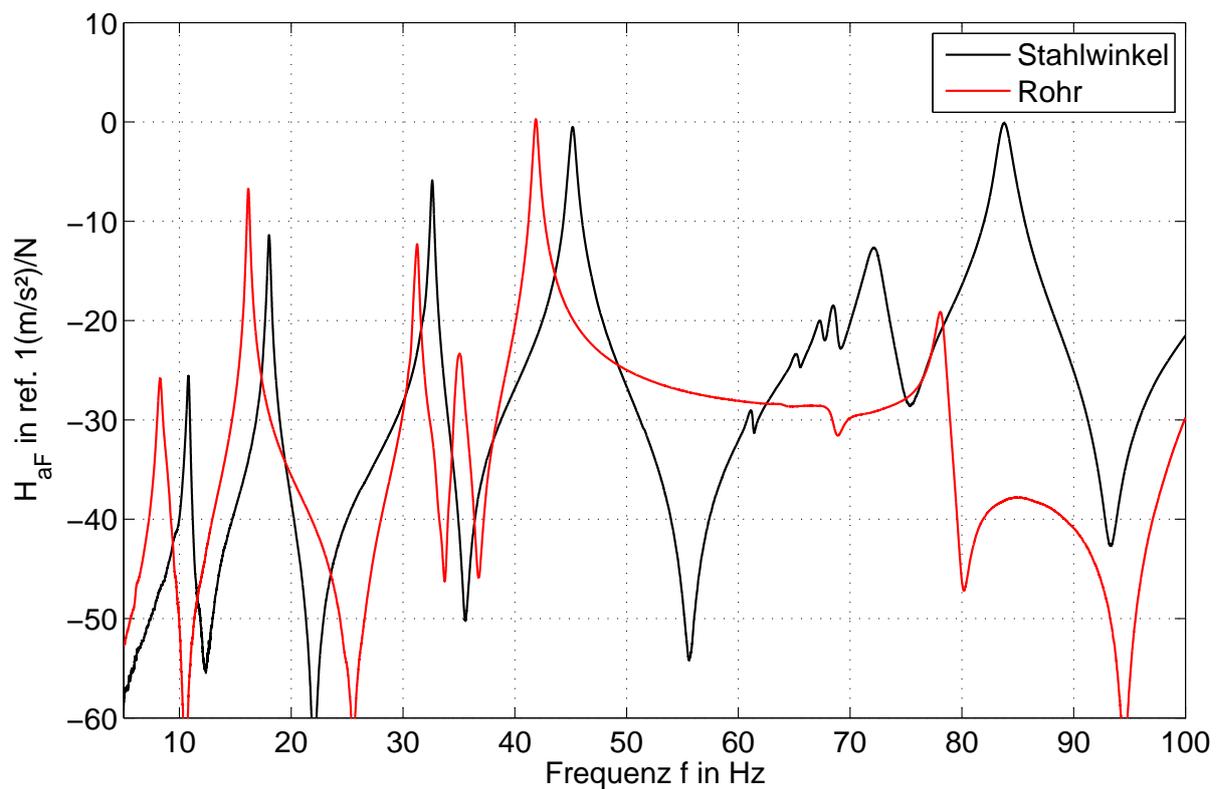


**Abbildung 3.25:** Auflagerung auf dem Rohr mit Verspannung durch Gewindestangen alle 25 cm

### 3.6.2 Gelenkige Auflagerung auf Stahlrohr mit Verschraubung von oben

Zunächst wird eine ideale gelenkige Auflagerung auf einem Stahlrohr mit einem Durchmesser von  $d = 33 \text{ mm}$  (s. Abb. 3.25) untersucht. Die Elemente werden im Bereich der Auflager im Abstand von  $25 \text{ cm}$  mit Bohrungen  $\varnothing 16 \text{ mm}$  versehen. Durch diese Bohrungen werden die Elemente mit Gewindestangen  $\varnothing M6$  nach unten verspannt. Dadurch wird eine Linienlast über die gesamte Elementbreite aufgebracht.

Die Gegenüberstellung der Eingangsakzeleranzen (s. Abb. 3.26) bei Auflagerung direkt auf dem Stahlwinkel und auf dem Rohr zeigt eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse hinsichtlich der Schwankungen im Verlauf der Eingangsakzeleranzen und auch im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Messungen mit den Simulationen. Die gemessenen Eigenfrequenzen der Elemente verringern sich durch die geänderte Auflagerung um ca.  $2 \text{ Hz}$  bis  $3 \text{ Hz}$ . Problematisch bei der Simulation des gelenkigen Auflagers ist jedoch, dass hierzu auch die Impedanz der Auflager in der Simulation als Randbedingung abgebildet werden muss. Deshalb soll vor weiteren Messungen an den Holzelementen eine Messung der Impedanz der Auflager erfolgen.



**Abbildung 3.26:** Vergleich der Eingangszkeleranzen bei Auflagerung direkt auf dem Lagerwinkel mit Verspannung der Ecken und bei Auflagerung auf dem Stahlrohr. Bei Auflagerung auf dem Stahlrohr verschieben sich die Eigenfrequenzen zu tieferen Werten, außerdem tritt eine weitere Resonanz bei ca. 35 Hz auf.

### 3.6.3 Messung der Auflagerimpedanzen an den Stahlwinkeln

Zur Messung der Eingangsimpedanzen an verschiedenen Positionen der Auflagerwinkel wird ein Beschleunigungsaufnehmer an den jeweiligen Messpunkt gesetzt und unmittelbar daneben mit dem großen Modalhammer (Endevco, Typ2304) angeregt. Durch Integration der Beschleunigung wird die Schnelle  $v$  errechnet und damit die Übertragungsfunktion  $H_{Fv}$  (Impedanz) bestimmt.

$$\underline{H}_{Fv} = \underline{Z} = \frac{F}{\left(\frac{a}{i \cdot \omega}\right)} = \frac{F}{\underline{v}} \quad \text{in} \quad \left(\frac{N}{m/s}\right) \quad (3.12)$$

Es werden die Eingangsimpedanzen an sieben Positionen entlang des Stahlwinkels bestimmt (s. Abb. 3.27). Es ist ersichtlich, dass die Impedanz der Auflager sehr hoch ist. Im Bereich bis ca. 20 Hz ist evtl. ein Masseverhalten der Struktur erkennbar. Dies lässt sich jedoch nicht aus dem Verlauf des Phasenwinkels  $\varphi$  erkennen. Ein resonanter Verlauf bei ca. 270 Hz bleibt ungeklärt.

### 3.6.4 Auflagerung auf Elastomer mit linienförmiger Einspannung

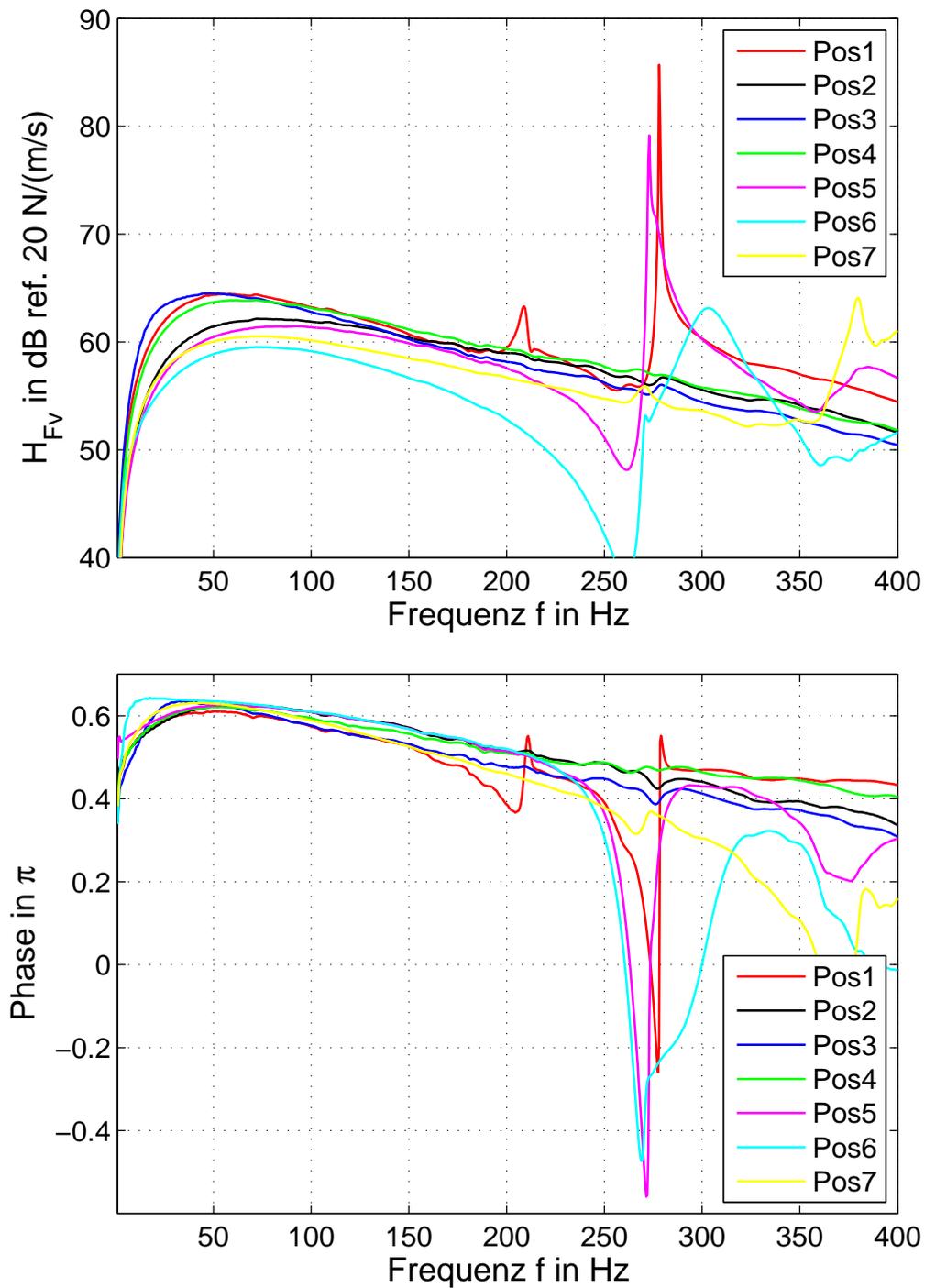
Da die korrekte Modellierung der Auflagerimpedanzen einen maßgeblichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat, werden Versuche mit der Auflagerung der Elemente auf einem Elastomer mit bekannter Steifigkeit durchgeführt. Die Lage eines Elastomeres zwischen den Stahlwinkeln und den Elementen bedeutet eine Reihenschaltung der mechanischen Impedanzen der Auflagerwinkel mit der des Elastomeres. Da auch ein relativ steifes Elastomer eine kleine Impedanz gegenüber den Auflagern hat, wird diese die Gesamtimpedanz maßgeblich bestimmen. Die resultierende Impedanz ergibt sich wie folgt:

$$Z_{res} = \left(\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_E}\right)^{-1} \quad \text{in} \quad \left(\frac{N}{m/s}\right) \quad (3.13)$$

$Z_A$  : Impedanz des Auflagers

$Z_E$  : Impedanz des Elastomeres

$Z_{res}$ : resultierende Impedanz



**Abbildung 3.27:** Eingangsimpedanzen der Auflagerwinkel gemessen an sieben Positionen entlang einer Auflagerhälfte bei Anregung mit dem großen Modalhammer. Das obere Diagramm zeigt die Impedanz in dB, das untere den Phasenwinkel.

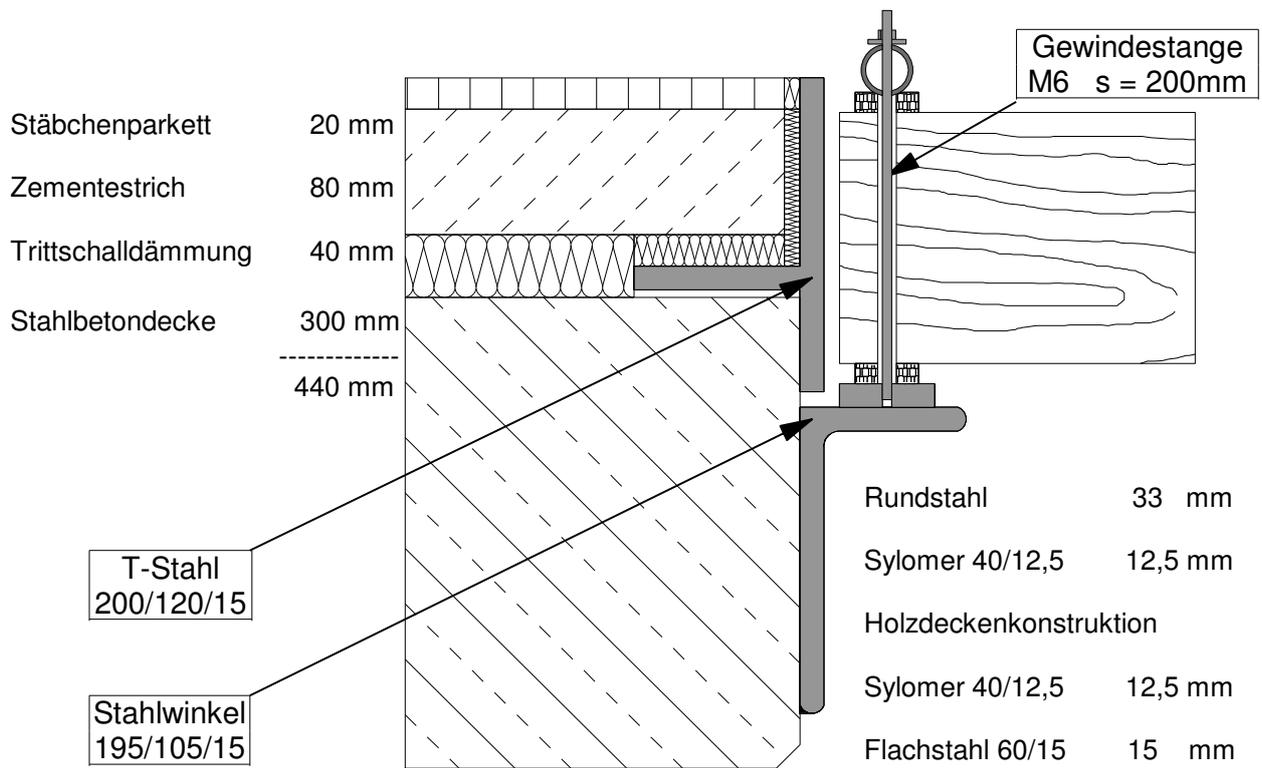
Als Elastomere werden folgende Materialien der Firma Getzner verwendet:

- Sylomer SR18
- Sylomer SR450
- Sylomer SR1200
- Sylodyn NC
- Sylodyn NF

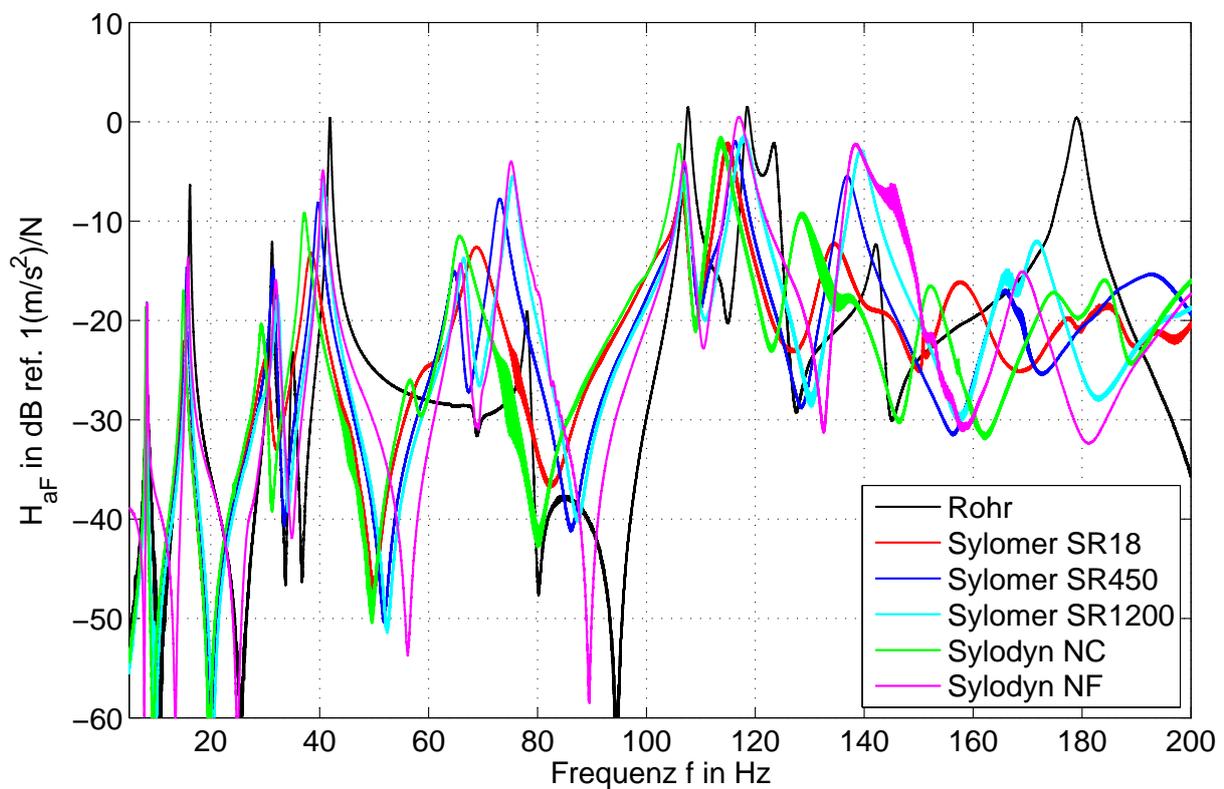
Es wird je ein Streifen des zu testenden Elastomeres mit einer Breite von  $b = 4 \text{ cm}$  und einer Dicke von  $d = 12.5 \text{ mm}$  auf den Stahlwinkel gelegt (s. Abb. 3.28). Ein weiterer Streifen liegt auf der Oberseite des Elementes. Mit Hilfe von Gewindestangen  $\varnothing M6$  mit einem Rasterabstand von  $25 \text{ cm}$  und eines oben als Gegenstück angesetzten Rohres wird das Element zwischen die Elastomere und auf die Auflagerwinkel geschraubt. Die Eingangsakzeleranzen in Abb. 3.29 zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Resonanzen von der Wahl des Materials hinsichtlich deren Lage, Amplitude und Dämpfung. In Abb. 3.30 ist der Verlauf der Eingangsakzeleranzen im Bereich zwischen  $5 \text{ Hz}$  und  $25 \text{ Hz}$  nochmals detaillierter dargestellt. Laut Herstellerangaben eignen sich für den hier gegebenen Lastbereich am besten die Materialien Sylomer SR450 und Sylodyn NF. Hierfür liegen gemessene Materialdaten vor und die Werkstoffe verhalten sich weitgehend linear. Die Ergebnisse der Messung in Abb. 3.29 und Abb. 3.30 zeigen, dass bei der Auflagerung auf Sylodyn NF das Verhalten im Bereich der Resonanzen stark von dem der anderen Elastomere abweicht. Gleiches gilt für die Materialien Sylodyn NC und Sylomer SR18 zwischen  $60 \text{ Hz}$  und  $90 \text{ Hz}$ . Lediglich die beiden Materialien Sylomer SR450 und SR1200 zeigen einen Verlauf, welcher dem der Auflagerung auf dem Rohr sehr nahe kommt.

Der Abgleich mit den Simulationen zeigt, dass sich die Lagerung auf Sylomer SR450 am besten abbilden lässt. Aus diesen Gründen wird für die Lagerung der Decken für alle weiteren Untersuchungen dieses Material verwendet.

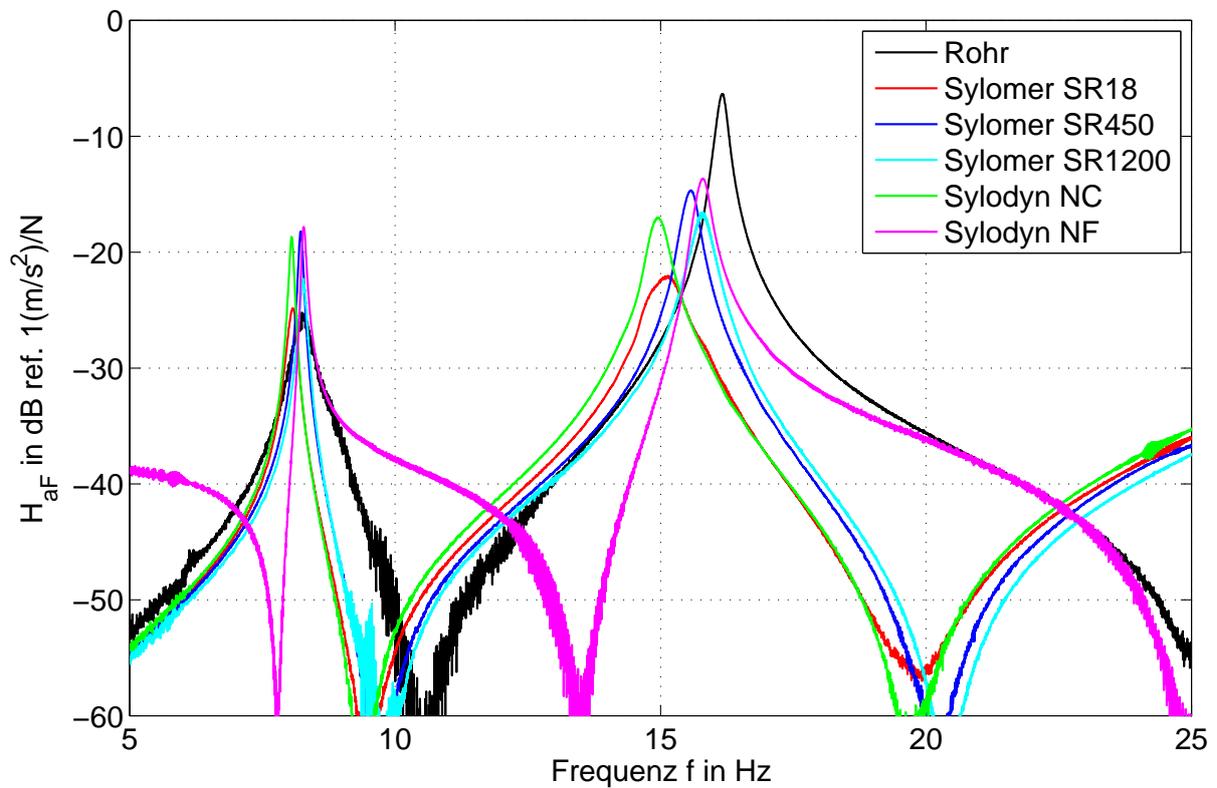
Die Deckenkonstruktionen werden wie in Abb. 3.31 gezeigt zwischen zwei Lagen Sylomer SR450 mit Hilfe von Gewindestangen  $\varnothing M6$  alle  $20 \text{ cm}$  und eines U-Profiles auf der Oberseite der Konstruktion verspannt. Durch Variation des Anzugdrehmomentes der Muttern auf der Oberseite kann die Vorspannung der Elastomere variiert werden. Um den Einfluss der Vorspannung durch die Gewindestangen zu untersuchen, werden Messungen mit einer Vorspannung von insgesamt  $20 \text{ kN/m}$  bei einem Anzugdrehmoment der Muttern von  $4.6 \text{ Nm}$  und mit einer sehr geringen Vorspannung bei einem minimalen Anzugdrehmoment durch leichtes Andrehen der Muttern von Hand vorgenommen. Die Messergebnisse der Eingangsakzeleranzen in Abb. 3.32



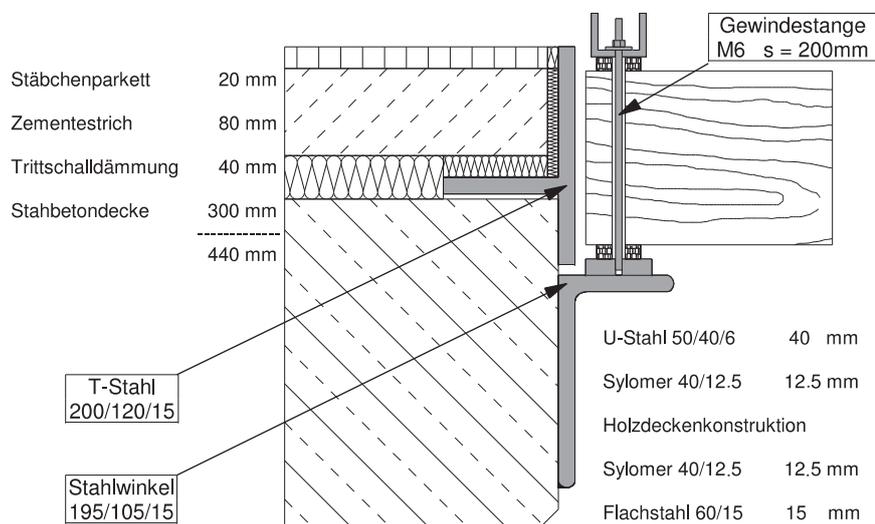
**Abbildung 3.28:** Auflagerung der Deckenkonstruktionen auf Sylomer mit Verspannung der Decken nach unten durch Gewindestangen M6 und ein oben liegendes Stahlrohr



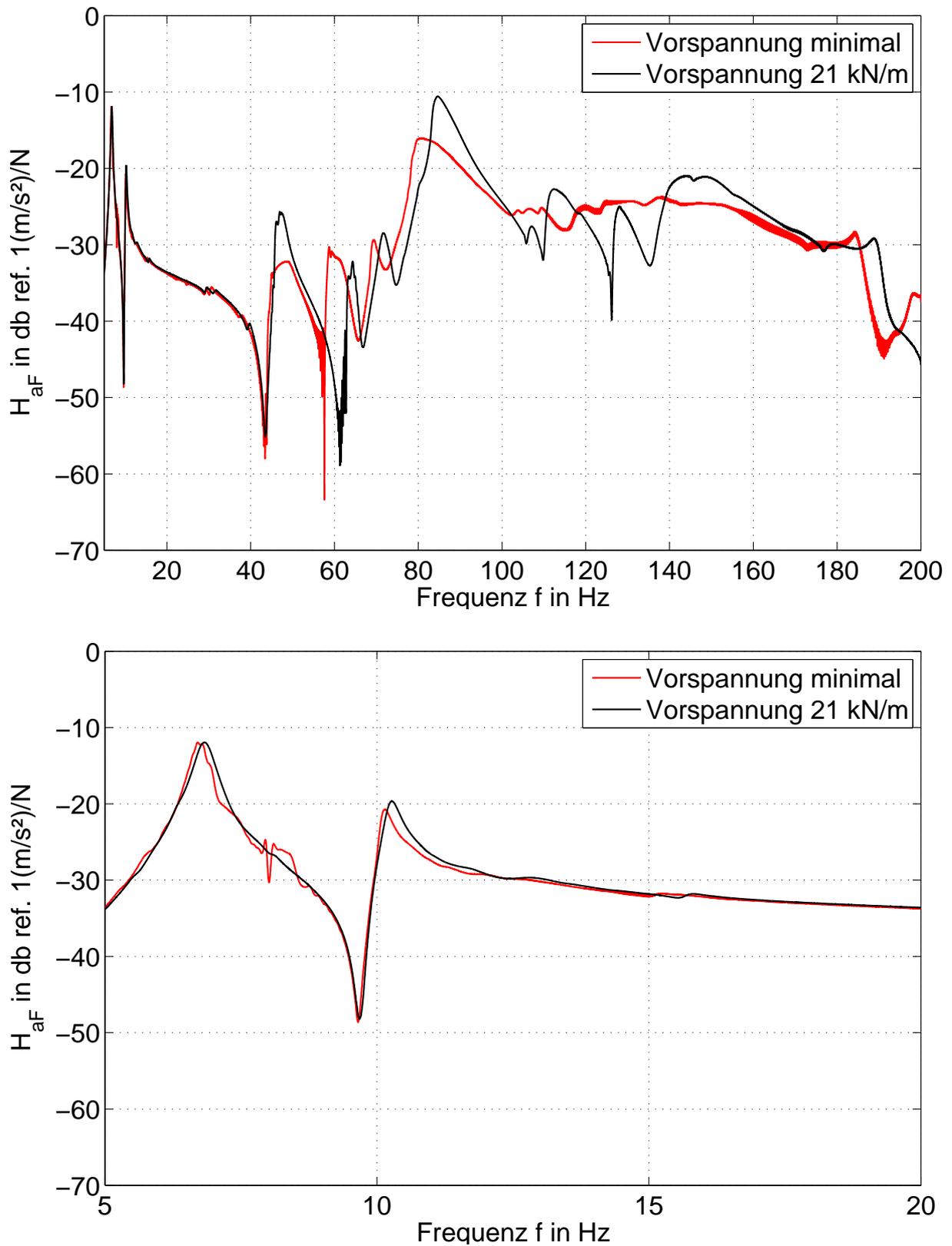
**Abbildung 3.29:** Vergleich der Eingangszkzeleranzen des Elementes bei Auflagerung auf verschiedenen Elastomeren und auf dem Rohr. Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Lage der Eigenfrequenzen und der Gesamtdämpfung der Eigenschwingungen.



**Abbildung 3.30:** Vergleich der Eingangszkeleranzien des Elementes bei Auflagerung auf verschiedenen Elastomeren im Bereich der ersten und zweiten Eigenmode.



**Abbildung 3.31:** Auflagerung der Deckenkonstruktionen auf Sylomer mit Verspannung der Decken nach unten durch Gewindestangen M6 und ein oben liegendes U-Stahlprofil



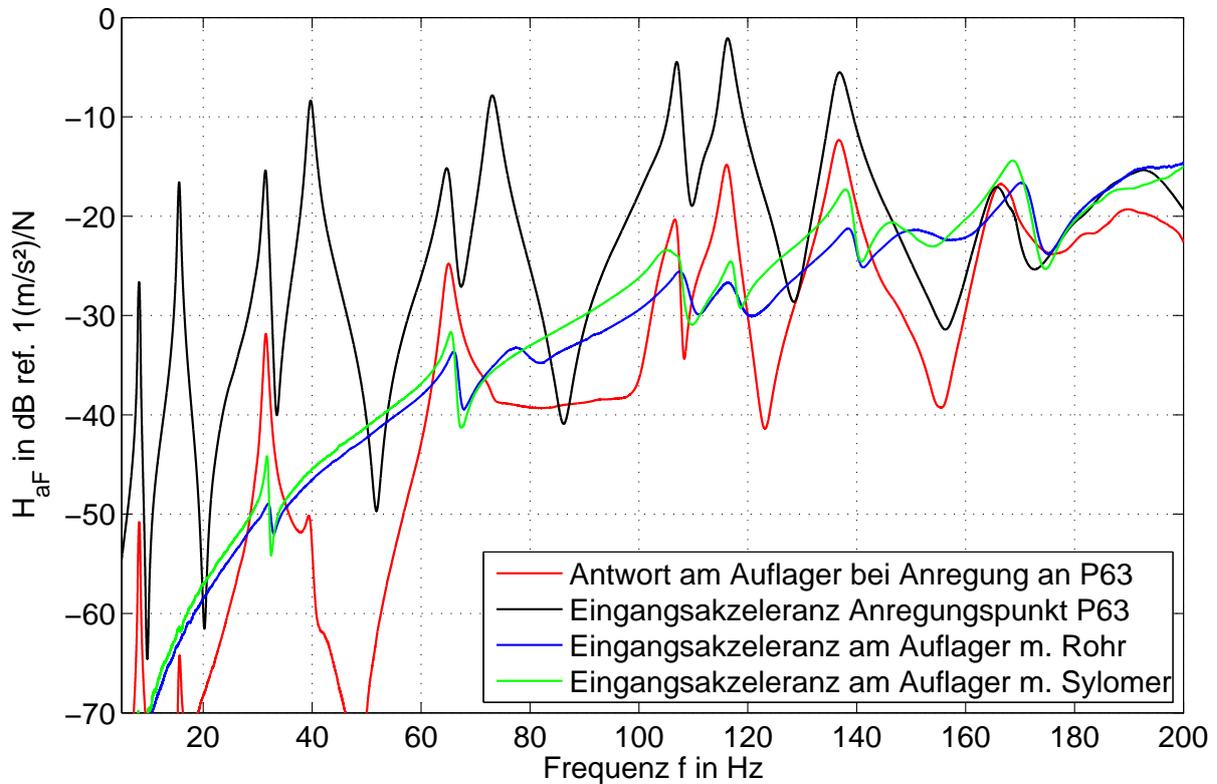
**Abbildung 3.32:** Vergleich der Eingangszeleranz eines Massivholzelementes bei Auflagerung mit minimaler Vorspannung bzw. bei einer Vorspannung mit 21 kN/m



zeigen, dass im Bereich der ersten Eigenschwingungen kaum eine Abhängigkeit von der Vorspannung besteht. Es sind lediglich kleine Abweichungen im Bereich zwischen den Maxima der Übertragungsfunktionen zu erkennen. Ab ca. 50 Hz sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Deshalb werden bei den folgenden Untersuchungen alle Muttern mit einem Anzugdrehmoment von  $M_a = 4,6 \text{ Nm}$  festgezogen, um eine Linienlast von ca. 20 kN/m zu erzeugen.

Eine Berechnung der Resonanz des gesamten Auflagerungssystems aus der oberen und unteren Lage Sylomer SR450, der Masse des Holzdeckenelementes und der Vorspannung mit Hilfe des Berechnungsprogrammes *freqcalc* der Firma Getzner [18] ergibt eine Eigenfrequenz von ca. 70 Hz. Da diese in dem zu untersuchenden Messbereich liegt, werden weitere Messungen durchgeführt, um den Einfluss dieser Resonanz auf die Messergebnisse zu untersuchen.

Zunächst wird eine Messung der Übertragungsfunktionen an den üblichen 7 x 3 Positionen auf der Decke durchgeführt und die Akzeleranz an den direkt am Auflager liegenden Messpunkten mit denen in Elementmitte platzierten verglichen (s. Abb. 3.33 rot und schwarz). Würde die Lagerung auf den Elastomeren zu einer deutlichen Resonanz mit Einfluss auf die Messung führen, so wäre zu erwarten, dass die Akzeleranz am Auflager höher oder gleich hoch wäre als die am Anregungspunkt.



**Abbildung 3.33:** Vergleich der Eingangsakzeleranzen direkt am Auflager und der Transferakzeleranz vom normalen Anregungspunkt zum Auflager und zur Feldmitte

Aus diesem Grunde wird eine weitere Messung durchgeführt, bei welcher das Element unmittelbar am Auflager angeregt wird (s. Abb. 3.33). Als Auflager kommt hier einmal das Rohr (blaue Linie) und einmal das Sylomer SR450 (grüne Linie) zum Einsatz. Für den Fall, dass das Sylomer eine zusätzliche Resonanz im Messbereich zur Folge hat, sollte diese nur in der grünen und nicht in der blauen Linie erkennbar sein. Der Verlauf der Akzeleranzen lässt demnach darauf schließen, dass im Bereich bis 200  $Hz$  kein störender Einfluss des Elastomer Auflagers auf das Verhalten der gemessenen Elemente zu erwarten ist.

## 3.7 Messung der abgestrahlten Schalleistung

Zur Bestimmung der abgestrahlten Schalleistung der Unterdecken werden im Empfangsraum Messungen der Schallintensität durchgeführt. Im Rahmen einer Masterarbeit [60] und einer Bachelorarbeit [54] wurden Messvorschriften erarbeitet, welche hier lediglich zusammengefasst werden.

### 3.7.1 Berechnung der Schallintensität

Die Messung der Intensität wird mit der in Kapitel 3.2.5 beschriebenen Zwei-Mikrofon-Sonde durchgeführt. Dabei wird der Schalldruck von zwei Mikrofonen, welche mit Hilfe eines sog. Abstandhalters in einem definierten Abstand zueinander in gleicher Achsrichtung angeordnet sind, gemessen und daraus mittels der Phasendifferenz der Mikrofonensignale die Schallintensität berechnet. Bei den hier beschriebenen Messungen wird die Berechnung der Schallintensität im Frequenzbereich aus den fouriertransformierten Messdaten der beiden Mikrofone durchgeführt.

$$I(f) = -\frac{1}{\rho_{Luft}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta r \cdot \Im(\underline{p}_1^*(f) \cdot \underline{p}_2(f)) \quad \text{in} \quad \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (3.14)$$

$\rho_{Luft}$  : Rohdichte der Luft

$\Delta r$  : Abstand zwischen den beiden Mikrofonen

$\underline{p}_1^*$  : konjugiert-komplexer Frequenzverlauf des Schalldruckes des einen Mikrofonens

$\underline{p}_2$  : komplexer Frequenzverlauf des anderen Mikrofonens

Das Schallfeld kann in einen Wirk- und Blindanteil unterschieden werden. Der für die Schallabstrahlung relevante Wirkanteil errechnet sich aus Gl. 3.14, welcher in der Literatur auch als aktive Intensität bezeichnet wird. Der Blindanteil des Schallfeldes, in der Literatur auch als reaktive Intensität benannt, ist im Nahfeld dominant, führt jedoch zu keinem Leistungseintrag in den Raum.

Die Auswertung der Intensität in n-tel-Oktaven geschieht durch Summation aller Frequenzlinien

innerhalb des jeweiligen Frequenzintervalls.

$$I_{ntel} = \sum_{f_{uG}}^{f_{oG}} I_w(f) \quad \text{in} \quad \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (3.15)$$

$I_{ntel}$  : Intensität innerhalb des gewählten n-tel-Oktavbandes

$f_{oG}$  und  $f_{uG}$  : obere- bzw. untere Grenzfrequenz des n-tel-Oktavbandes.

Die Schallintensität gibt die Schalleistung pro Fläche an. Die abgestrahlte Schalleistung kann aus der mittleren Intensität daher wie folgt berechnet werden.

$$P_{ges}(f) = \bar{I}_m(f) \cdot A \quad \text{in} \quad W \quad (3.16)$$

$\bar{I}_m(f)$  : flächengemittelte Schallintensität

$A$  : Messfläche

$P_{ges}$  : Schalleistung der Fläche  $A$

### 3.7.2 Durchführung der Intensitätsmessung

Die Messung der Intensität wird ebenfalls mit Anregung durch den Schwingerreger mittels eines Gleitsinus durchgeführt. Da für jede Position eine einzelne Messung durchgeführt werden muss, wird die Messdauer deutlich reduziert auf  $T_{mess} = 32s$ . Die Auswirkung der kürzeren Messzeiten werden in [60] und [54] untersucht. Es zeigt sich, dass mit der gegebenen Messdauer eine ausreichend genaue Messung der Intensität im gewählten Frequenzbereich möglich ist.

Da für die übertragene Schalleistung die tiefsten Frequenzen nicht relevant sind, wird ein Gleitsinus verwendet, welcher bei einer Frequenz von  $16 Hz$  startet. Die obere Frequenzgrenze wird ebenfalls verschoben, um eine deutliche Überlappung mit den in der Bauakustik üblichen Bereichen zu erhalten. Zur Messung der tiefen Frequenzen muss ein Spacer mit einer Länge von  $100 mm$  verwendet werden. Die daraus resultierende höchste messbare Frequenz ist  $600 Hz$ . Dies stellt die obere Frequenzgrenze des anregenden Gleitsinus dar.

Zur Durchführung der Messungen wird der Raum wie in Kapitel 3.2.5 in Abb. 3.11 dargestellt bedämpft. Die Sonde wird so auf dem Verfahrssystem montiert, dass der Abstand zwischen dem

Mittelpunkt der beiden Mikrofone und der Unterseite der zu messenden Decke 30 cm beträgt. Die Schnelle an den einzelnen Messpunkten wird mit Hilfe eines Beschleunigungsaufnehmers und nachträglicher Integration ebenfalls an jedem Punkt gemessen. Aus der flächengemittelten abgestrahlten Schalleistung und der Oberflächenschnelle kann der Abstrahlgrad bestimmt werden.

$$\sigma(f) = \frac{\bar{I}_m(f)}{\overline{v^2}(f) \cdot \rho_L \cdot c_L} \quad (3.17)$$

$\sigma$  : Abstrahlgrad

$\bar{I}$  : flächengemittelte Intensität

$\overline{v^2}$  flächengemitteltes Schallschnellequadrat

$\rho_L$  : Rohdichte der Luft

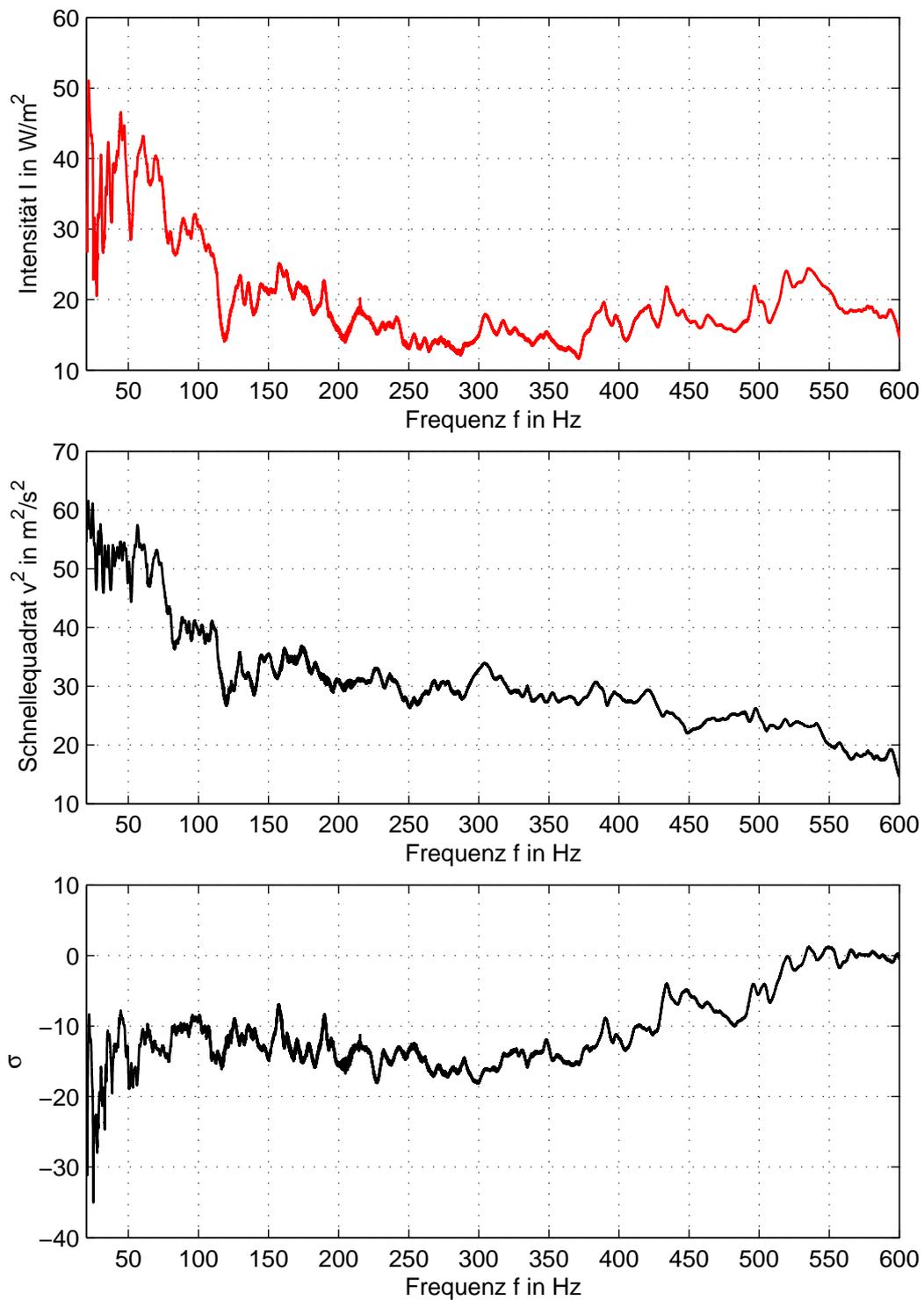
$c_L$  : Schallgeschwindigkeit in Luft

Zur besseren Vergleichbarkeit der Messungen wird die gemessene Intensität immer auf die durch den Schwingerreger aufgebrachte Kraft referenziert. In Abb. 3.34 sind beispielhaft die gemessene Intensität, die Oberflächenschnelle und der daraus errechnete Abstrahlgrad dargestellt.

### 3.8 Resultierende Messvorschriften

Aus den Untersuchungen im vorliegenden Kapitel ergeben sich für die weiteren Experimente an den Holzdeckenkonstruktionen folgende Messvorschriften:

- Die Anregung erfolgt durch einen Schwingerreger, welcher an dem Kransystem unterhalb der Stahlbetondecke des Labores abgehängt wird. Die Aufhängung erfolgt mit Ketten, wobei der Schwingerreger so weit abgehängt wird, dass ein Stößel von ca. 20 cm Länge verwendet werden kann. Die Masse des Systems wird durch Betonsteine zusätzlich um ca. 60 kg erhöht. Das Kransystem wird im Bereich der Aufhängung mit zwei Gewindestangen zur Aussteifung gegen die Stahlbetondecke verspannt (s. Abb. 3.19).
- Als Anregungssignal für den Schwingerreger wird ein logarithmischer Gleitsinus im Frequenzbereich von 3 Hz bis 210 Hz mit einer Dauer von 512 s verwendet.



**Abbildung 3.34:** Vergleich von Intensität, Oberflächenschnelle und Abstrahlgrad gemessen an einer abgehängten Unterdecke unter einer Holzbalkendecke.

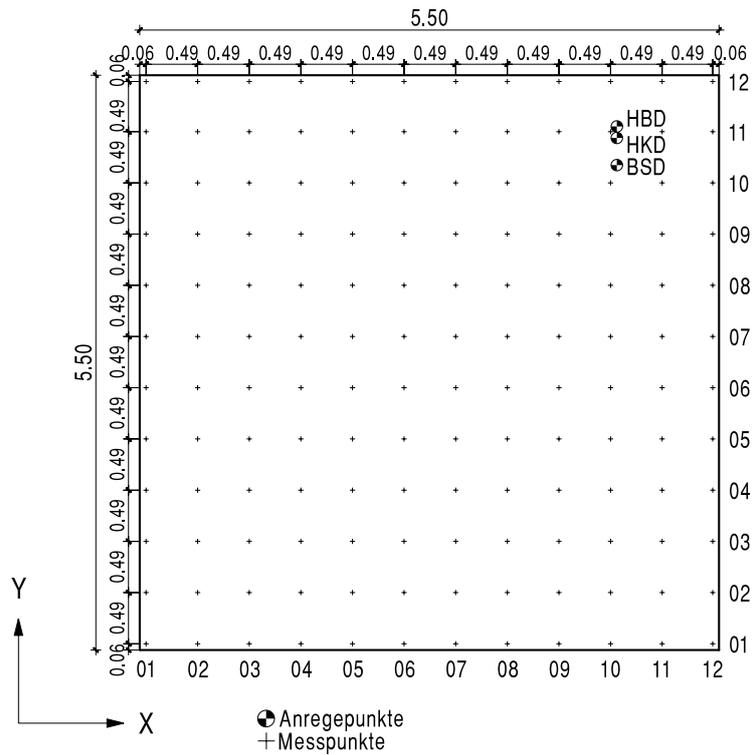


- Die Auflagerung erfolgt auf den Stahlwinkeln des Labores, wobei zwischen Winkel und Prüfobjekt ein Streifen ( $40\text{ mm} \times 12.5\text{ mm}$ ) des Elastomers Sylomer SR450 gelegt wird. Auf der Oberseite befindet sich ein weiterer Sylomerstreifen. Die Decke wird von oben über ein U-Profil auf dem oberen Elastomer mit Gewindestangen ( $\varnothing M6$  alle  $20\text{ cm}$ ) auf die Stahlwinkel des Auflagers verspannt (s. Abb. 3.31). Bei einem Anzugsdrehmoment der Muttern von  $4.6\text{ NM}$  ergibt sich eine resultierende Linienlast von  $20\text{ kN/m}$ .
- Die Intensitätssonde wird so unter dem Messpunkt befestigt, dass der Abstand zwischen abstrahlender Oberfläche und Spacermitte  $30\text{ cm}$  beträgt. Bei der Messung der abgestrahlten Schalleistung wird mit einem logarithmischen Gleitsinus mit einer Dauer von  $T = 32\text{ s}$  im Frequenzbereich von  $16\text{ Hz}$  bis  $630\text{ Hz}$  angeregt.

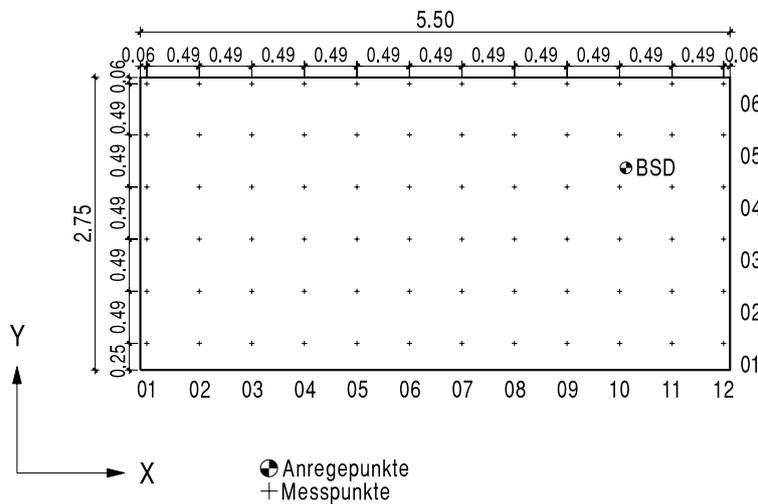


## 4 Durchgeführte Messungen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse in Form von Eingangsakzeleranzen, Resonanzfrequenzen, Schwingungsformen und Dämpfung der untersuchten Strukturen dargestellt. Die Akzeleranzen werden im Frequenzbereich von  $5 \text{ Hz}$  bis  $200 \text{ Hz}$  dargestellt, die Ergebnisse der Intensitätsmessungen im Bereich von  $20 \text{ Hz}$  bis  $200 \text{ Hz}$ . Bei Messungen an Deckenaufbauten mit den Maßen  $5,5 \text{ m} \times 5,5 \text{ m}$  wurde an der Position P1011 angeregt, bei den Messungen an Decken mit  $5,5 \text{ m} \times 2,75 \text{ m}$  an der Position P1005 (s. Abb. 4.1 und 4.2). Die Auflagerung der untersuchten Decken erfolgt immer wie in Kapitel 3.6.4 in Abb. 3.31 dargestellt. Die zwei-seitig aufgelagerten Decken spannen immer in x-Richtung, in den Abbildungen also von links unten nach rechts oben. bei den Abbildungen können im Bereich der Auflager, vor allem bei höheren Frequenzen, durchaus deutliche Verformungen sichtbar sein. Dies ist bedingt durch die elastische Einspannung, welche geringfügige Verformungen am Auflager zulässt. Die vierseitig aufgelagerten Decken sind zusätzlich bei  $y = 0 \text{ m}$  und  $y = 5,5 \text{ m}$  in der gleichen Weise wie in x-Richtung aufgelagert. Die Linienlast durch die Verschraubung an den Auflagern beträgt immer ca.  $20 \text{ kN/m}$ .



**Abbildung 4.1:** Mess- und Anregungspunkte auf der ganzen Decke im Raster mit 12 x 12 Messpunkten. Die Lage der Anregungspunkte für die verschiedenen Systeme unterscheidet sich geringfügig.



**Abbildung 4.2:** Mess- und Anregungspunkte auf der halben Decke im Raster mit 12 x 6 Messpunkten. Diese Variante kommt nur bei der Leno162 Decke zum Einsatz.

Die Ergebnisse der Messungen werden in Form der Eingangszkelerenzen der Rohdecke bzw.



des Estrichs und bei mehrschichtigen Aufbauten zusätzlich durch die Transferakzeleranzen vom Anregungspunkt zu den unmittelbar darunter liegenden Punkten der weiteren Lagen dargestellt. Diese Darstellungen ermöglichen die Identifikation von Resonanzfrequenzen der Deckensysteme. Tabellarisch sind die aus den Darstellungen der Eingangsakzeleranzen gefundenen Resonanzfrequenzen und die dazugehörigen Betriebsschwingungsformen sowie die zugehörigen modalen Dämpfungswerte aus ME'SCOPE<sup>®</sup> bzw. berechnet aus der Halbwertsbreite zusammengefasst. Zum Vergleich der maximalen Amplituden der Schwingformen werden zudem Diagramme mit den Maxima aus den Imaginärteilen aller Transferakzeleranzen der gemessenen Lagen eingefügt. Anhand dieser Kurven lassen sich also die maximalen Amplituden in den Abbildungen bewerten. Werden Intensitätsmessungen unterhalb der Deckenaufbauten durchgeführt, so werden die gemessenen Intensitäten und Oberflächenschnellen und die daraus ermittelten Abstrahlgrade frequenzabhängig dargestellt.

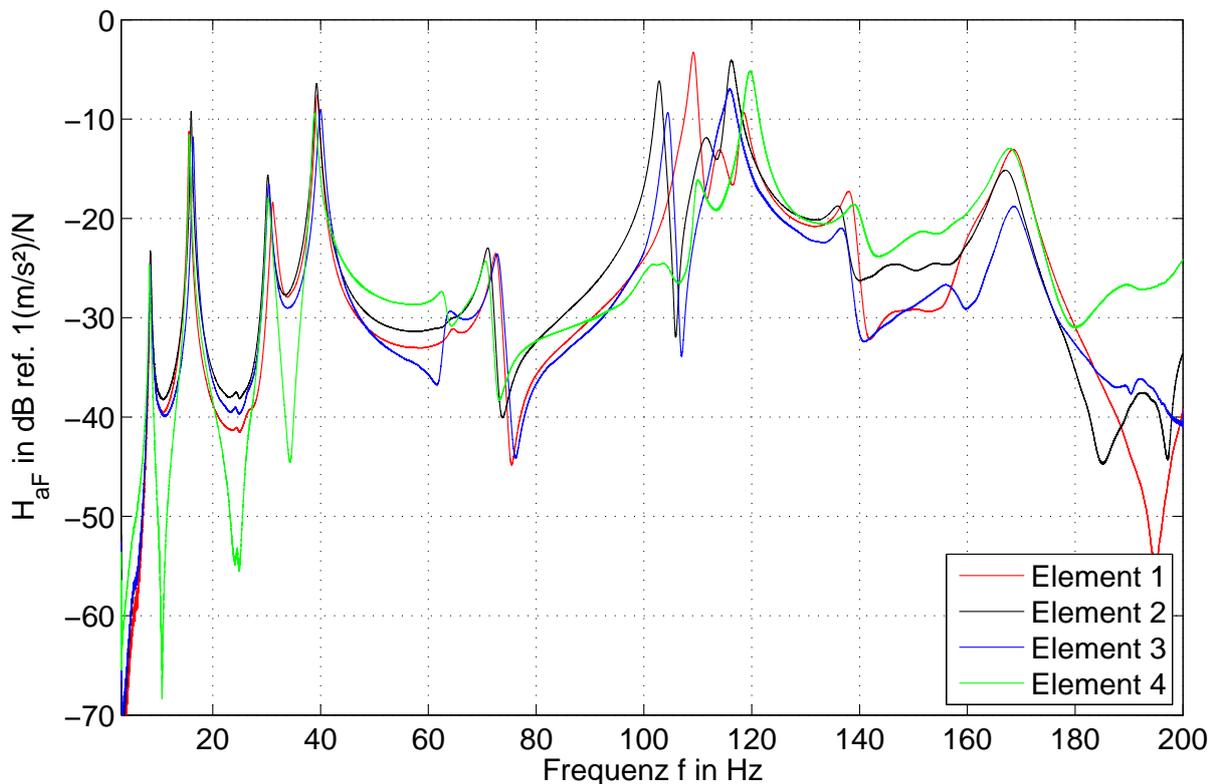
## 4.1 Messungen an Massivholzdecken

Es werden zwei Deckensysteme, Leno105 und Leno162 mit verschiedenen Aufbauten untersucht. Vor dem Aufbau der Rohdecke werden jeweils die vier einzelnen Massivholzelemente vermessen. Die Rohdecke aus Leno105 erhält im weiteren Ausbau lediglich eine abgehängte Unterdecke, während die Leno162 Rohdecke mit je einem Trocken- und einem Fließestrich und einer Unterdecke ausgebaut und in allen Aufbauvariationen vermessen wird. Bei den Konstruktionen mit Unterdecke werden zusätzlich zu den Schwingungsmessungen auch Messungen zur Schallabstrahlung durchgeführt.

## 4.1.1 Einzelelemente

### 4.1.1.1 Leno105

In Abb. 4.3 sind die Eingangsakzeleranzen der vier unabhängig voneinander gemessenen Einzelelemente dargestellt.



**Abbildung 4.3:** Eingangsakzeleranzen der vier einzeln gemessenen Elemente aus Leno105 mit den Abmessungen  $l = 5.5 \text{ m}$  und  $b = 1.37 \text{ m}$ . Die Elemente werden jeweils auf der Position aufgelagert, auf der sie später in der Rohdecke zu liegen kommen. Durch die unterschiedliche Lage sind auch die Abweichungen zwischen den ersten vier Maxima bei Element 4 zu erklären. Da diese Abweichungen keinen Einfluss auf die Lage der Resonanzfrequenzen haben, wurden sie nicht näher untersucht.

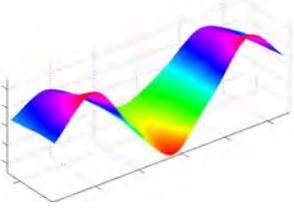
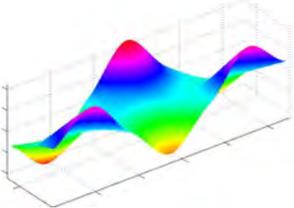
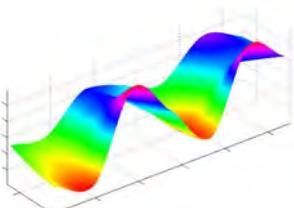
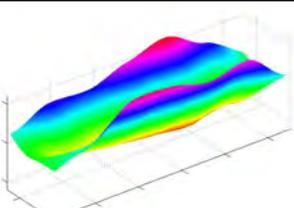
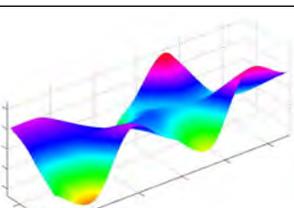
Tabelle 4.1 listet die mit ME'SCOPE<sup>®</sup> berechneten Resonanzfrequenzen  $f$  und die dazugehörigen modalen Dämpfungsgerade  $D$  und die daraus berechneten Mittelwert (MW) und Standardabweichung (STAW) auf. In der rechten Spalte sind die jeweils dazugehörigen Schwingungsfor-

men abgebildet. Die Maxima der Imaginärteile der Transferakzeleranzen, also die maximalen Amplituden der jeweiligen Schwingungsformen, werden in Abb. 4.4 in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt.

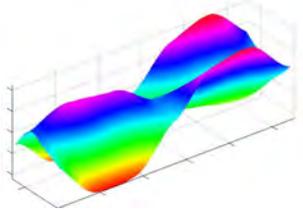
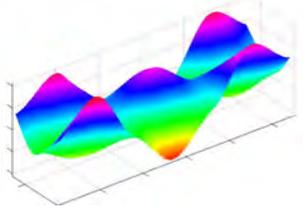
**Tabelle 4.1:** Leno105 vier einzelne Elemente, Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform

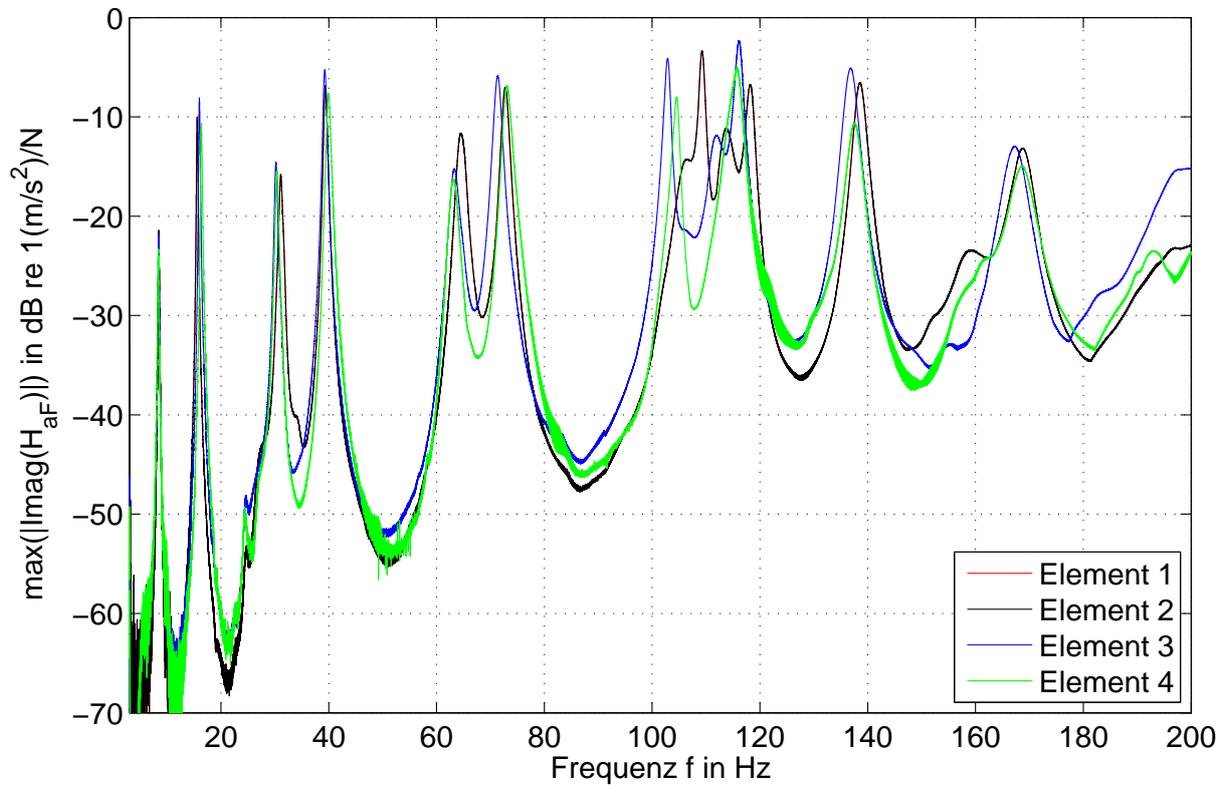
| Nr. | E1                    |                | E2                    |                | E3                    |                | E4                    |                | MW ± STAW             |                | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-------------------------|
|     | $\frac{f}{\text{Hz}}$ | $\frac{D}{\%}$ |                         |
| 1   | 8.0                   | 0.5            | 8.4                   | 1.7            | 8.4                   | 1.7            | 8.3                   | 1.3            | $8.3 \pm 0.1$         | $1.3 \pm 0.5$  |                         |
| 2   | 15.6                  | 0.9            | 16.0                  | 1.0            | 16.4                  | 1.1            | 15.7                  | 1.0            | $15.9 \pm 0.3$        | $1.0 \pm 0.1$  |                         |
| 3   | 31.1                  | 1.2            | 30.2                  | 1.2            | 30.4                  | 1.2            | 30.3                  | 1.6            | $30.5 \pm 0.4$        | $1.3 \pm 0.2$  |                         |
| 4   | 39.4                  | 1.0            | 39.3                  | 1.1            | 40.0                  | 1.3            | 38.8                  | 1.2            | $39.4 \pm 0.4$        | $1.1 \pm 0.1$  |                         |

**Tabelle 4.1:** Leno105 vier einzelne Elemente, Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform

| Nr. | E1                    |                | E2                    |                | E3                    |                | E4                    |                | MW ± STAW             |                | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|---|
|     | $\frac{f}{\text{Hz}}$ | $\frac{D}{\%}$ |   |
| 5   | 64.3                  | 1.4            | 63.2                  | 1.9            | 63.1                  | 1.8            | 63.1                  | 1.6            | 63.4 ± 0.5            | 1.6 ± 0.2      |    |
| 6   | 72.7                  | 1.0            | 71.3                  | 1.2            | 73.0                  | 1.4            | 71.0                  | 1.4            | 72.0 ± 0.9            | 1.2 ± 0.2      |    |
| 7   | 105.0                 | 2.0            | 103.0                 | 0.7            | 104.4                 | 0.7            | 108.0                 | 2.2            | 105.1 ± 1.8           | 1.4 ± 0.7      |  |
| 8   | 109.0                 | 0.6            | 105.0                 | 1.0            | 105.0                 | 0.7            | 110.0                 | 0.6            | 107.3 ± 2.3           | 0.7 ± 0.2      |  |
| 9   | 113.0                 | 1.6            | 112.0                 | 1.8            | 116.0                 | 0.9            | 110.0                 | 0.6            | 112.8 ± 2.2           | 1.2 ± 0.5      |  |

**Tabelle 4.1:** Leno105 vier einzelne Elemente, Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform

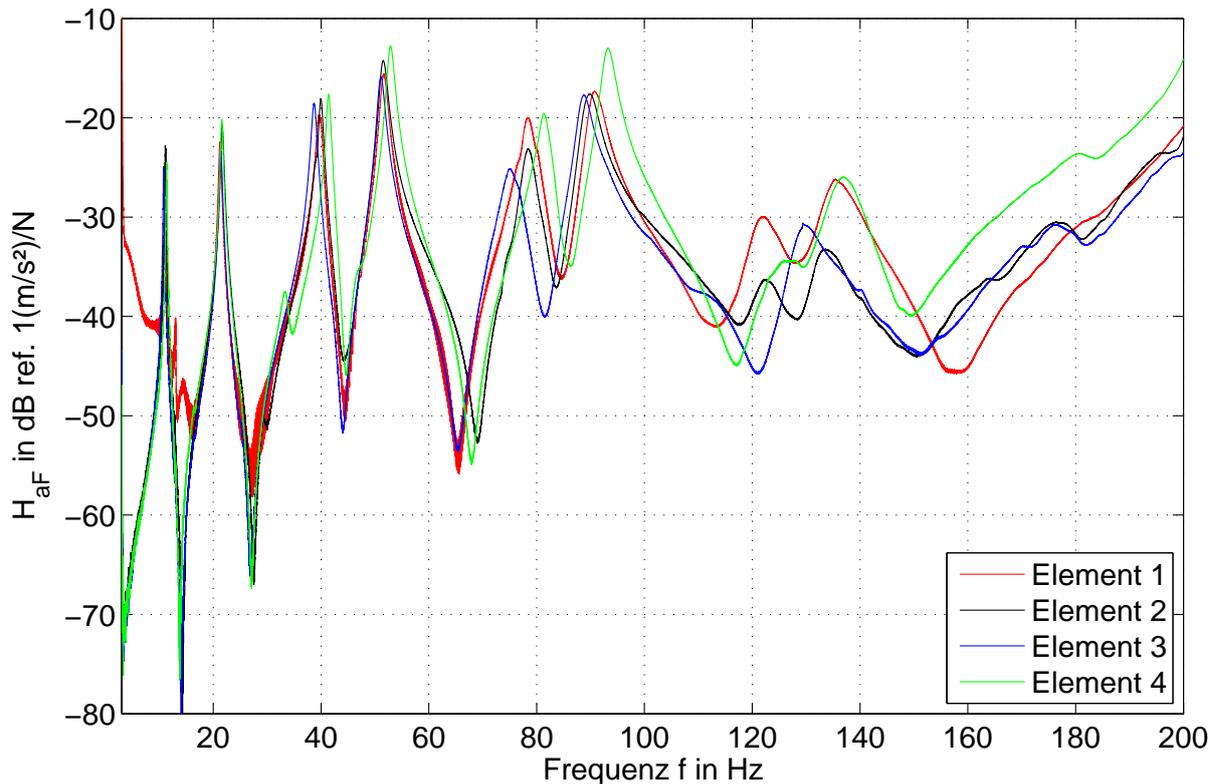
| Nr. | E1                    |                | E2                    |                | E3                    |                | E4                    |                | MW ± STAW             |                | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|---|
|     | $\frac{f}{\text{Hz}}$ | $\frac{D}{\%}$ |   |
| 10  | 118.0                 | 0.8            | 116.0                 | 0.8            | 116.0                 | 0.9            | 120.0                 | 0.9            | 117.5 ± 1.7           | 0.8 ± 0.1      |  |
| 11  | 139.0                 | 1.0            | 137.0                 | 1.1            | 138.0                 | 1.2            | 140.0                 | 1.2            | 138.5 ± 1.1           | 1.1 ± 0.1      |  |



**Abbildung 4.4:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

#### 4.1.1.2 Leno162

In Abb. 4.5 sind die Eingangsakzeleranzen der vier Einzelelemente dargestellt.



**Abbildung 4.5:** Eingangsakzeleranzen der vier einzeln gemessenen Elemente aus Leno162 mit den Abmessungen  $l = 5.5 \text{ m}$  und  $b = 1.37 \text{ m}$ . Der vor und nach der ersten Eigenresonanz abweichende Verlauf der Eingangsakzeleranz von Element1 ist auf die Lage des Elementes bei der Messung zurückzuführen. Die hohen Werte unterhalb der ersten Resonanzfrequenz lassen sich auf eine fehlerhafte Anregung in diesem Frequenzbereich zurückführen.

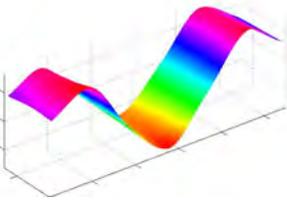
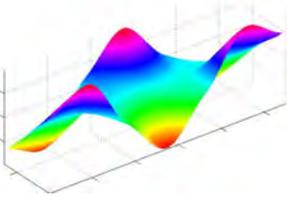
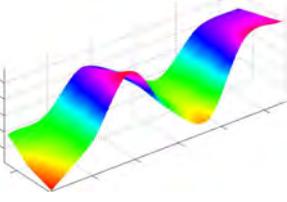
Tabelle 4.2 listet die aus den Maxima der Eingangsakzeleranzen abgelesenen Resonanzfrequenzen  $f$  und die dazugehörigen modalen Dämpfungsgerade  $D$ , berechnet aus der Halbwertsbreite auf. Des Weiteren werden die daraus berechneten **MW** und **STAW** aufgelistet. In der rechten Spalte sind die jeweils dazugehörigen Betriebsschwingungsform abgebildet. Die Resonanzfrequenzen von Element 4 liegen über den gesamten Frequenzbereich deutlich höher als die der anderen Elemente. Die Masse des Elementes liegt ebenfalls deutlich über der

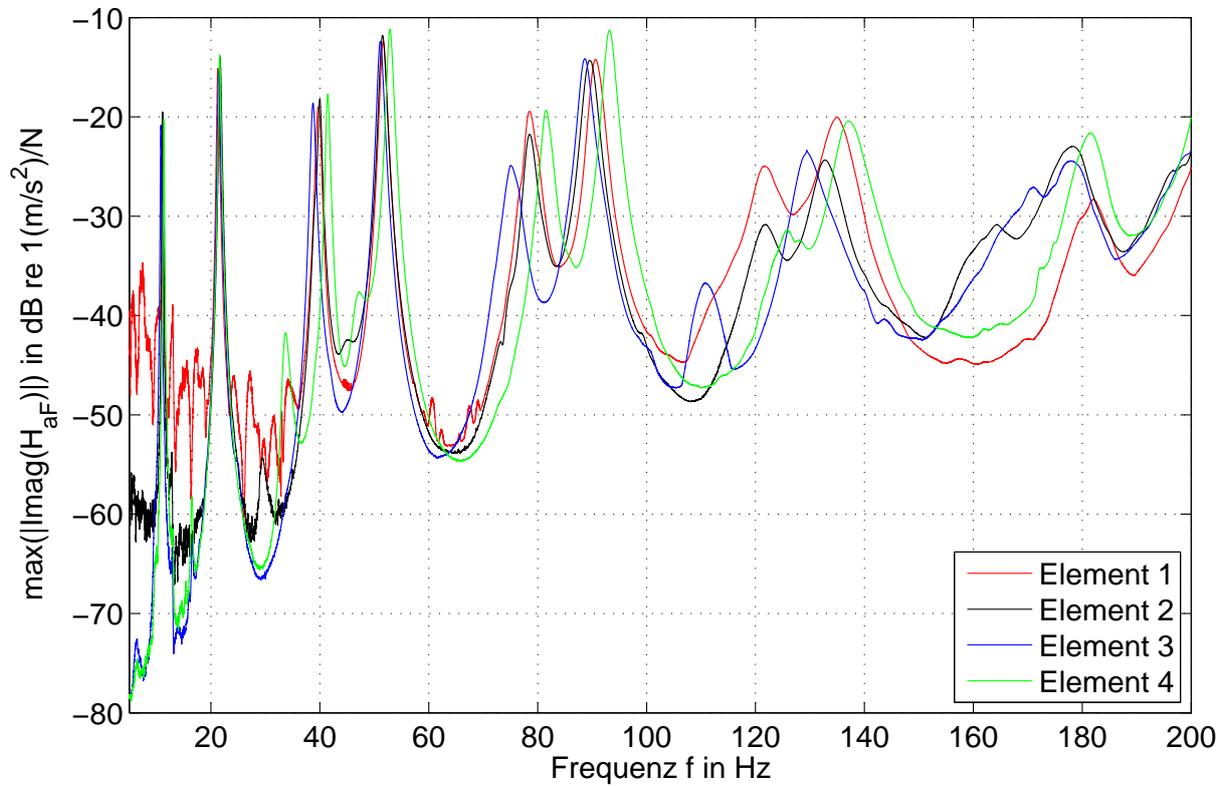
der anderen Elemente (s. Tabelle 2.2). Die höheren Eigenresonanzen trotz der höheren Masse des Elementes weisen auf eine deutlich größere Steifigkeit hin. Die maximalen Amplituden der jeweiligen Betriebsschwingungsformen werden in Abb. 4.6 in Abhängigkeit der Frequenz dargestellt.

**Tabelle 4.2:** Leno160 vier einzelne Elemente, Resonanzfrequenzen mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

| Nr. | E1                    |                | E2                    |                | E3                    |                | E4                    |                | MW ± STAW             |                | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-------------------------|
|     | $\frac{f}{\text{Hz}}$ | $\frac{D}{\%}$ |                         |
| 1   | 11.1                  | 0.5            | 11.1                  | 0.7            | 10.8                  | 0.5            | 11.4                  | 0.5            | $11.1 \pm 0.2$        | $0.5 \pm 0.1$  |                         |
| 2   | 21.3                  | 0.7            | 21.7                  | 1.6            | 21.4                  | 0.7            | 21.6                  | 0.7            | $21.5 \pm 0.2$        | $1.0 \pm 0.4$  |                         |
| 3   | 39.7                  | 1.0            | 40.0                  | 0.9            | 38.7                  | 0.8            | 41.5                  | 0.7            | $40.0 \pm 1.0$        | $0.8 \pm 0.1$  |                         |
| 4   | 51.6                  | 0.9            | 51.5                  | 1.1            | 51.1                  | 0.8            | 52.9                  | 0.8            | $51.8 \pm 0.7$        | $0.9 \pm 0.1$  |                         |

**Tabelle 4.2:** Leno160 vier einzelne Elemente, Resonanzfrequenzen mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

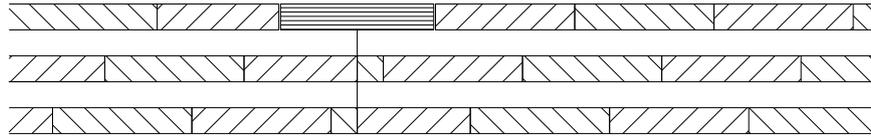
| Nr. | E1                    |                | E2                    |                | E3                    |                | E4                    |                | MW ± STAW             |                | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------|---|
|     | $\frac{f}{\text{Hz}}$ | $\frac{D}{\%}$ |   |
| 5   | 78.5                  | 1.1            | 78.5                  | 1.2            | 75.1                  | 1.4            | 81.5                  | 0.9            | 78.4 ± 2.3            | 1.1 ± 0.2      |    |
| 6   | 90.6                  | 1.0            | 89.6                  | 2.1            | 88.7                  | 1.0            | 93.2                  | 0.8            | 90.5 ± 1.7            | 1.3 ± 0.5      |    |
| 7   | 121.7                 | –              | 122.0                 | –              | 129.4                 | –              | 137.2                 | –              | 127.6 ± 6.4           | –              |  |



**Abbildung 4.6:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

## 4.1.2 Rohdecke

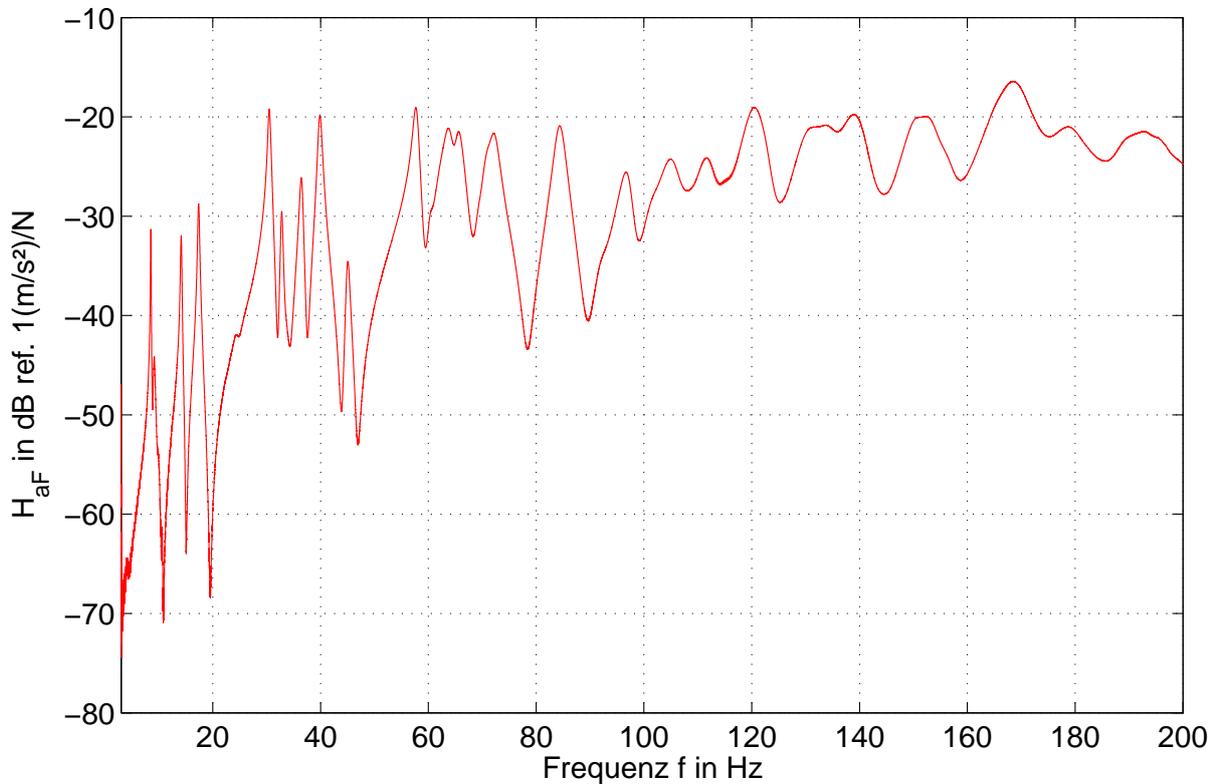
Die Rohdecken aus vier Leno105 Elementen und vier Leno162 Elementen ohne zusätzliche Anbauten wird je einmal als zweiseitig aufgelagerte und einmal als vierseitig aufgelagerte Decke gemessen.



**Abbildung 4.7:** Rohdecke aus Leno105 bzw. Leno162 Massivholzelementen. Spannweite:  $l = 5.50 \text{ m}$ ,  
 Breite  $b = 5.50 \text{ m}$ .

### 4.1.2.1 Leno105 zweiseitig aufgelagert

In Abb. 4.8 ist der Verlauf der Eingangssakzeleranz der Rohdecke dargestellt.



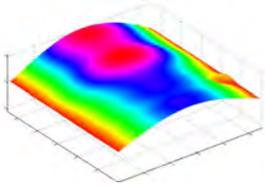
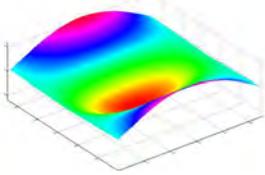
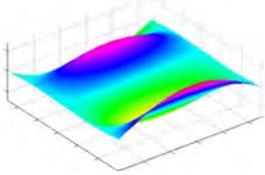
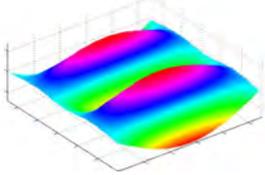
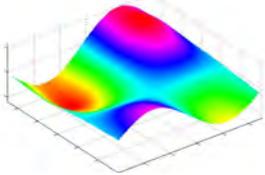
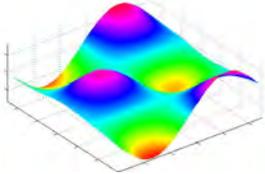
**Abbildung 4.8:** Eingangszakzeleranz von Rohdecke aus Leno105, zweiseitig aufgelagert.

Tabelle 4.3 listet die Resonanzfrequenzen mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen der zweiseitig aufgelagerten Decke aus Leno105 auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.9 entnommen werden.

**Tabelle 4.3:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105, zweiseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|----------|-------------------------|
| 1   | 8.5       | 0.6      |                         |

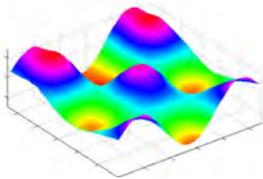
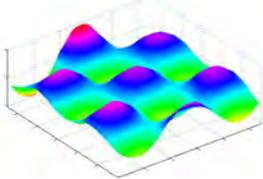
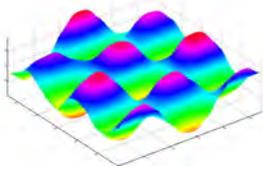
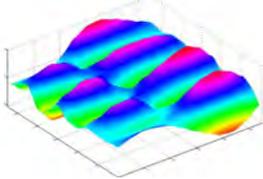
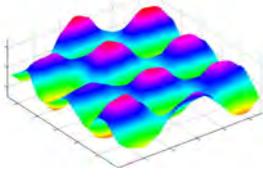
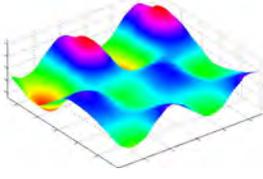
**Tabelle 4.3:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105, zweiseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

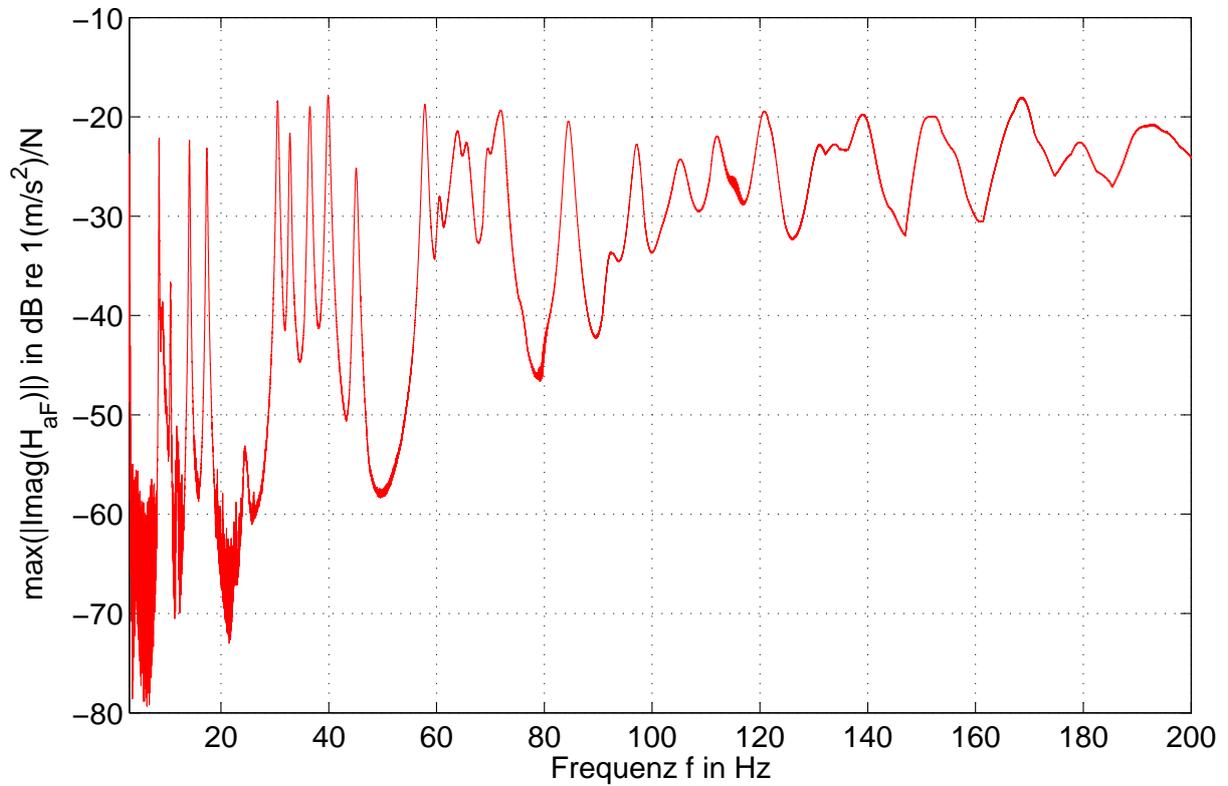
| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 2   | 9.1       | –        |    |
| 3   | 10.6      | 0.7      |    |
| 4   | 14.2      | 0.9      |   |
| 5   | 17.4      | 1.0      |  |
| 6   | 30.5      | 0.8      |  |
| 7   | 32.8      | 0.8      |  |

**Tabelle 4.3:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105, zweiseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE<sup>®</sup> und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-------------|----------|-------------------------|
| 8   | 36.5        | 1.0      |                         |
| 9   | 39.9        | 1.0      |                         |
| 10  | 45.1        | 0.9      |                         |
| 11  | 57.8        | 1.0      |                         |
| 12  | 60.5        | 1.0      |                         |
| 13  | 63.5        | 1.3      |                         |

**Tabelle 4.3:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105, zweiseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

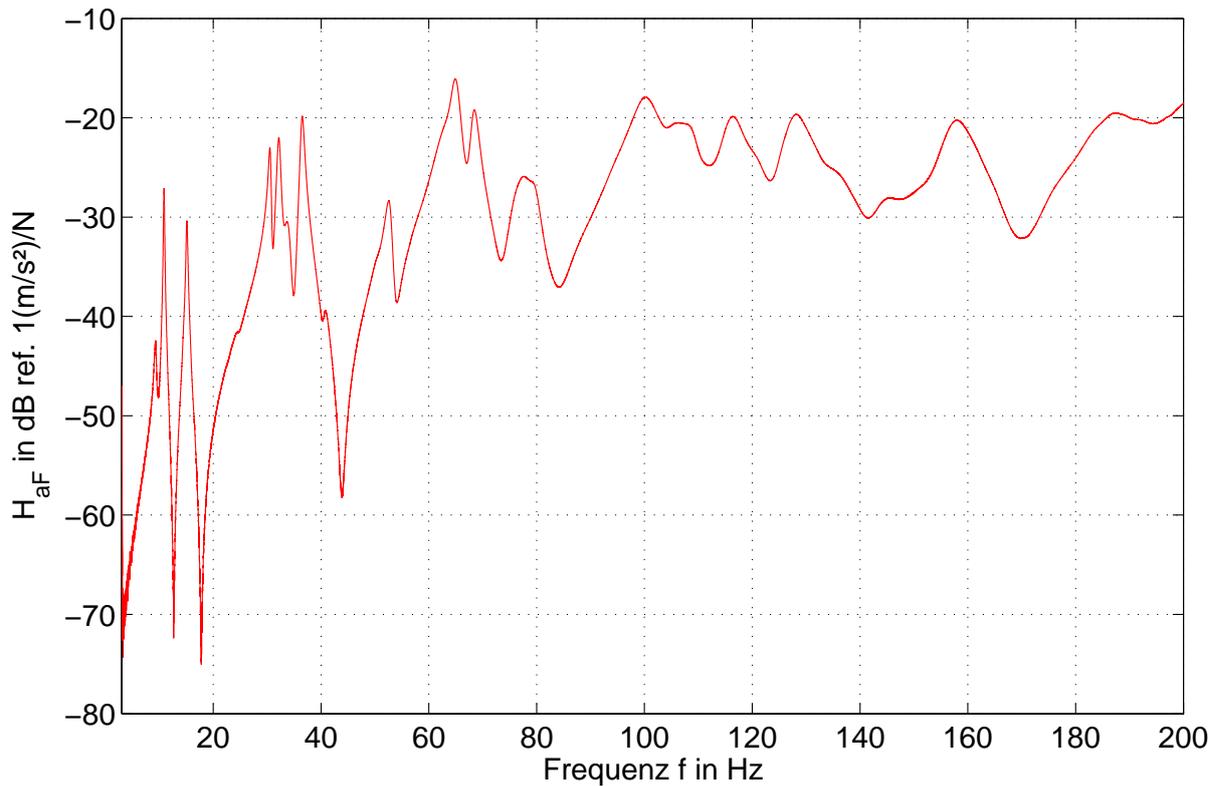
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 14  | 65.4        | 1.2      |    |
| 15  | 72.2        | 1.3      |    |
| 16  | 84.4        | 1.3      |   |
| 17  | 92.3        | 1.6      |  |
| 18  | 97.1        | 1.3      |  |
| 19  | 104         | 1.6      |  |



**Abbildung 4.9:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

#### 4.1.2.2 Leno105 vierseitig aufgelagert

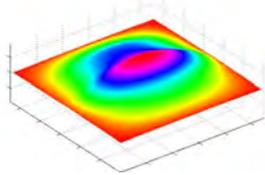
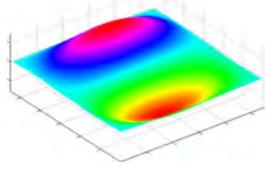
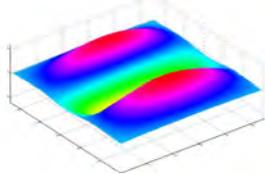
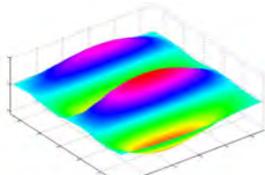
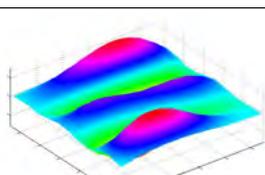
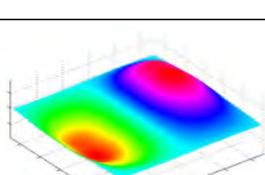
Abb. 4.10 zeigt die Eingangsakzeleranz der vierseitig aufgelagerten Decke aus Leno105.



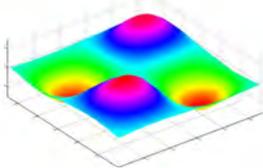
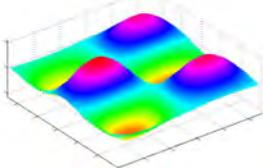
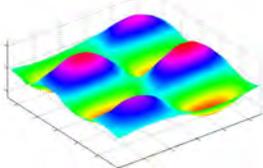
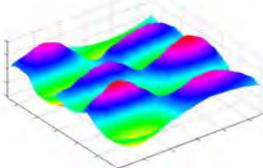
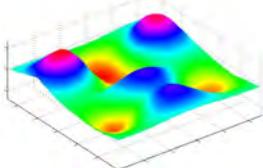
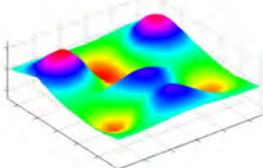
**Abbildung 4.10:** Eingangsakzeleranz von Rohdecke aus Leno105, vierseitig aufgelagert.

Tabelle 4.4 listet die Resonanzfrequenzen mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen der vierseitig aufgelagerten Decke aus Leno105 auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.11 entnommen werden.

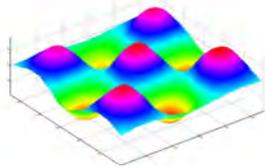
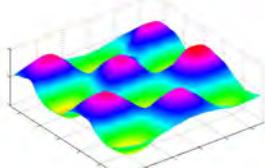
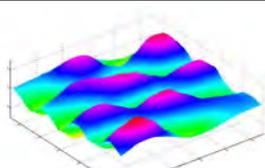
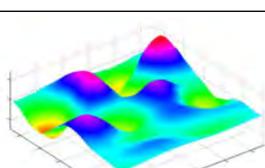
**Tabelle 4.4:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105, vierseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform

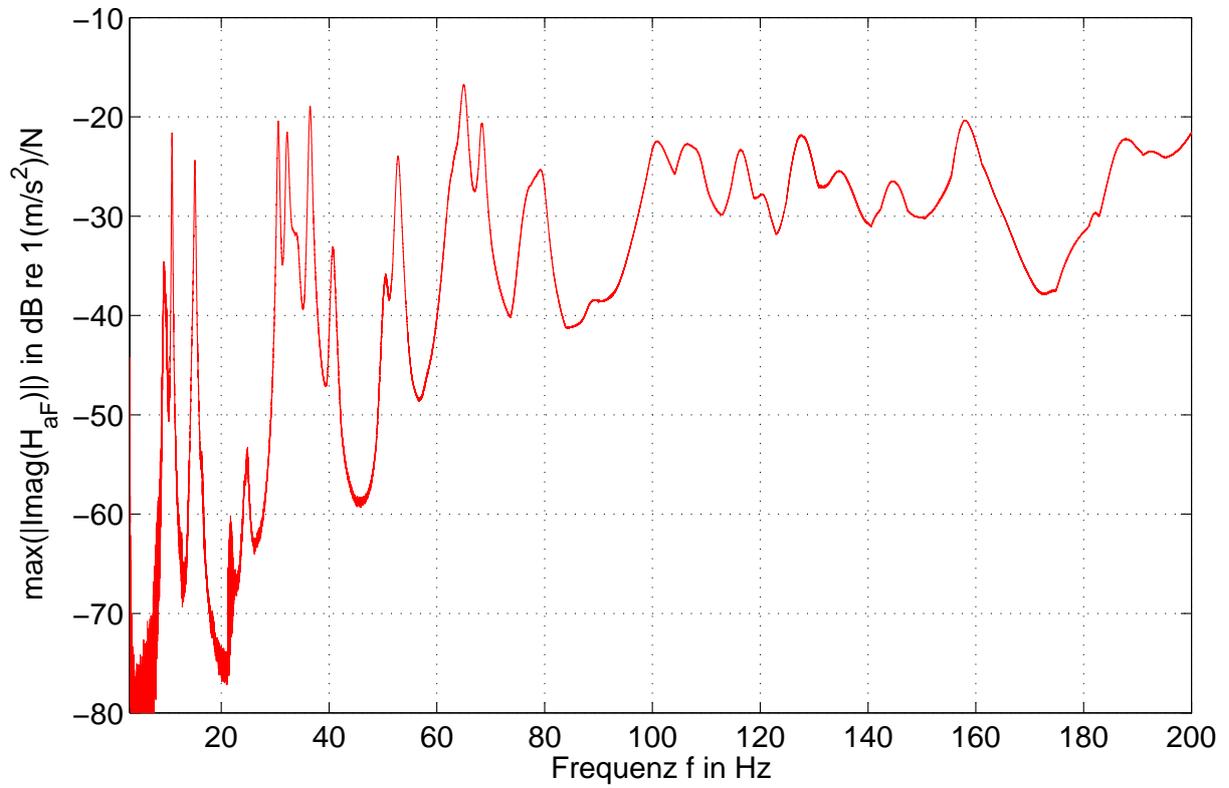
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 1   | 9.4         | 1.7      |    |
| 2   | 10.9        | 0.9      |    |
| 3   | 15.1        | 1.1      |   |
| 4   | 30.6        | 0.8      |  |
| 5   | 32.1        | 0.8      |  |
| 6   | 36.5        | 1.0      |  |

**Tabelle 4.4:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105, vierseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME<sup>SCOPE</sup>® und Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 7   | 40.7      | 1.4      |    |
| 8   | 50.5      | 1.4      |    |
| 9   | 52.8      | 1.3      |   |
| 10  | 64.7      | 1.5      |  |
| 11  | 68.3      | 1.2      |  |
| 12  | 76.8      | —        |  |

**Tabelle 4.4:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105, vierseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform

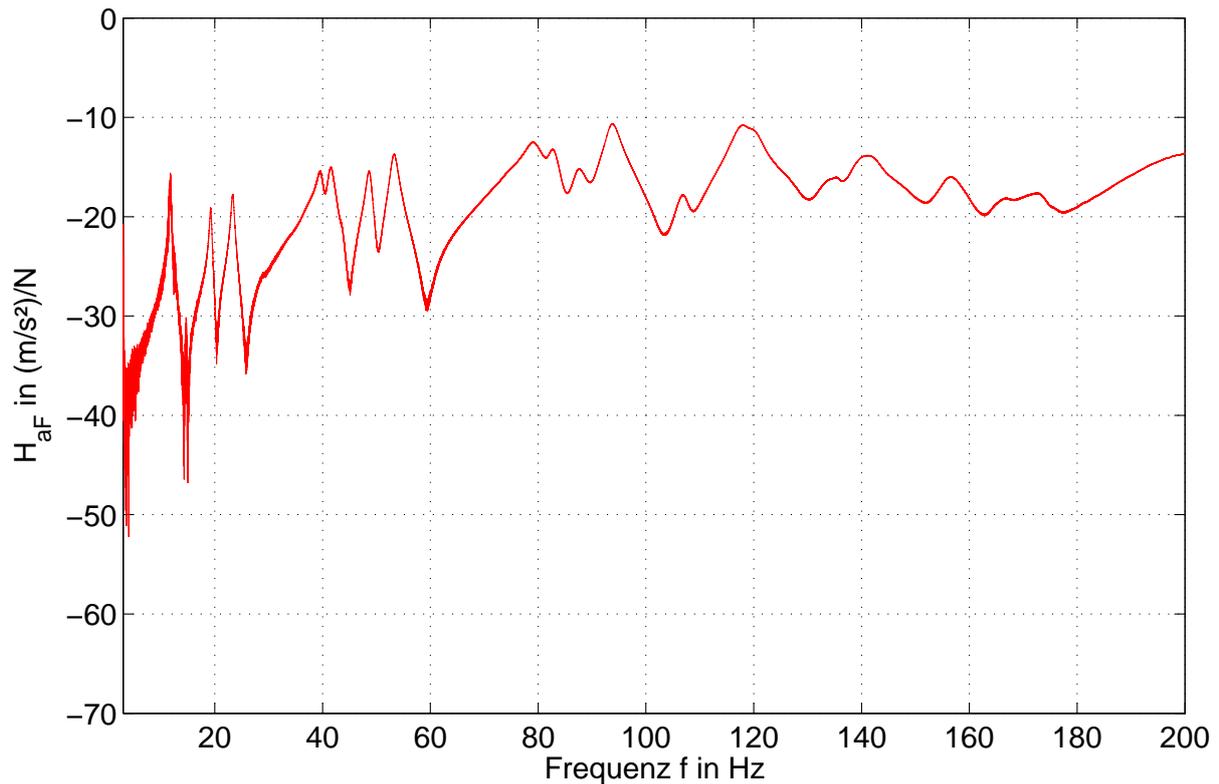
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 13  | 79.6        | 1.5      |    |
| 14  | 101         | 2.2      |    |
| 15  | 106         | 1.9      |   |
| 16  | 108         | 1.8      |  |



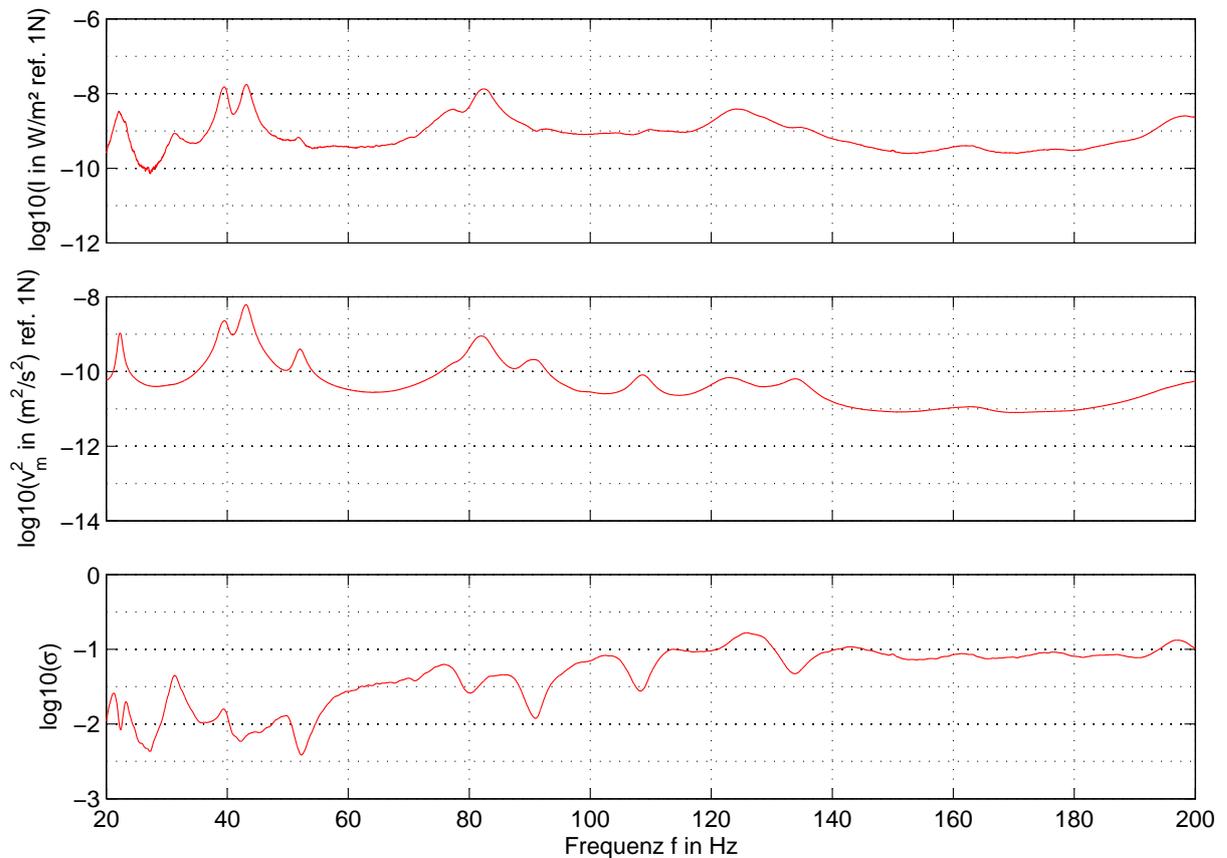
**Abbildung 4.11:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

### 4.1.2.3 Leno162 zweiseitig aufgelagert

Abb. 4.12 kann der Verlauf der Eingangsakzeleranz der zweiseitig aufgelagerten Rohdecke aus Leno162 entnommen werden.



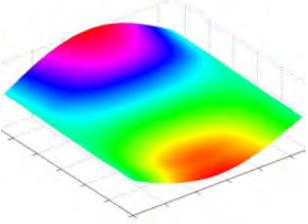
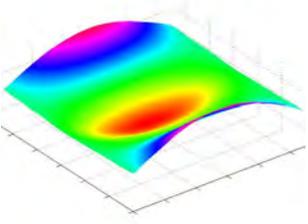
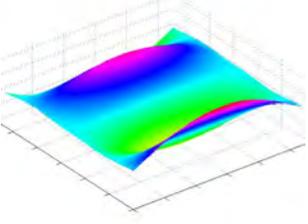
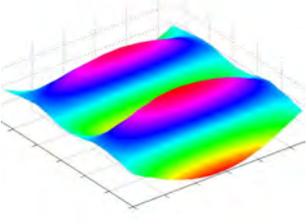
**Abbildung 4.12:** Eingangsakzeleranz der zweiseitig gelagerten Rohdecke aus vier Leno162-Elementen ohne zusätzliche Ausbauten.



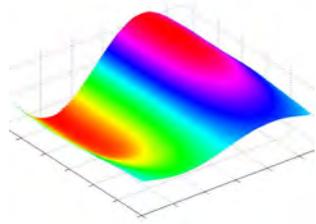
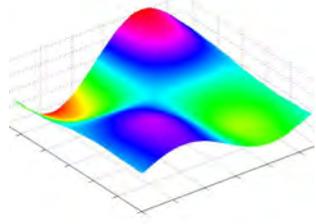
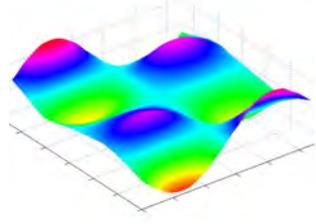
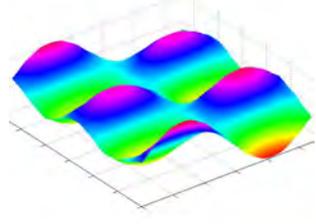
**Abbildung 4.13:** Vergleich von Intensität, Schellequadrat und Abstrahlgrad gemessen an einer Leno162-Rohdecke mit den Abmessungen  $l = 5.50 \text{ m}$  und  $b = 2.75 \text{ m}$ .

Tabelle 4.5 listet die Resonanzfrequenzen mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebschwingungsformen der zweiseitig aufgelagerten Decke aus Leno105 auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebschwingungsformen können Abb. 4.14 entnommen werden.

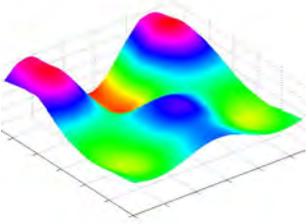
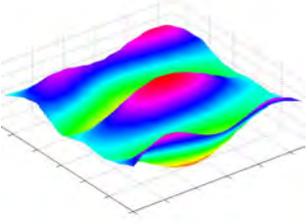
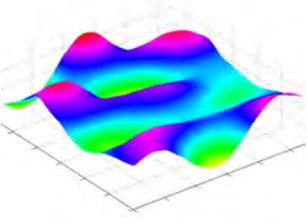
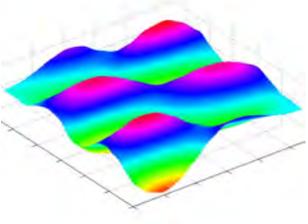
**Tabelle 4.5:** Resonanzfrequenzen Leno162 zweiseitig gelagert mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-------------|----------|--|
| 1   | 11.8        | 0.7      |    |
| 2   | 14.7        | 0.6      |   |
| 3   | 19.3        | 0.7      |  |
| 4   | 23.3        | 0.7      |  |

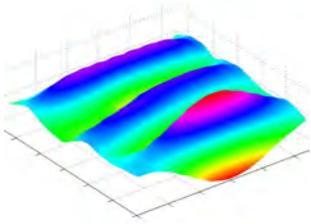
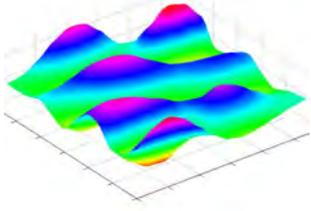
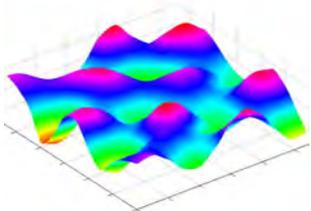
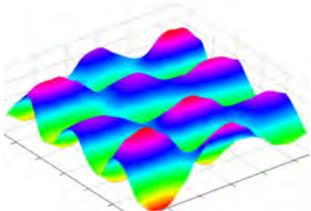
**Tabelle 4.5:** Resonanzfrequenzen Leno162 zweiseitig gelagert mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 5   | 39.7      | 1.2      |    |
| 6   | 41.5      | 1.1      |   |
| 7   | 48.7      | 0.7      |  |
| 8   | 53.3      | 0.8      |  |

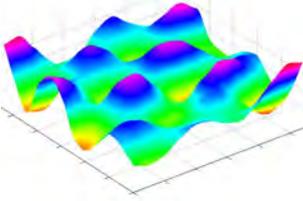
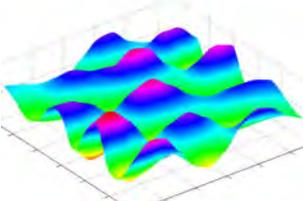
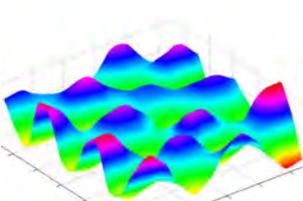
**Tabelle 4.5:** Resonanzfrequenzen Leno162 zweiseitig gelagert mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

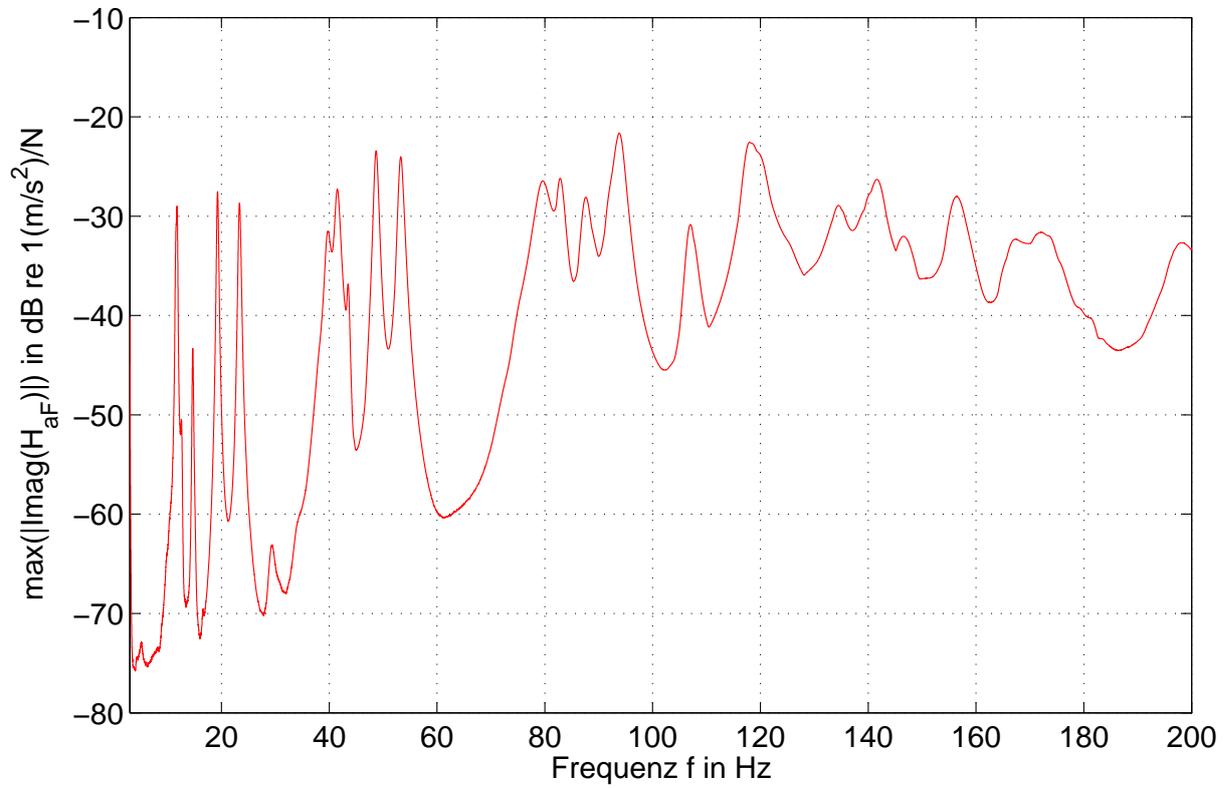
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-------------|----------|--|
| 9   | 79.5        | —        |    |
| 10  | 82.7        | —        |   |
| 11  | 87.8        | —        |  |
| 12  | 93.7        | 0.9      |  |

**Tabelle 4.5:** Resonanzfrequenzen Leno162 zweiseitig gelagert mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 13  | 107.0     | —        |    |
| 14  | 118.2     | 1.2      |   |
| 15  | 135.3     | —        |  |
| 16  | 140.6     | 1.7      |  |

**Tabelle 4.5:** Resonanzfrequenzen Leno162 zweiseitig gelagert mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

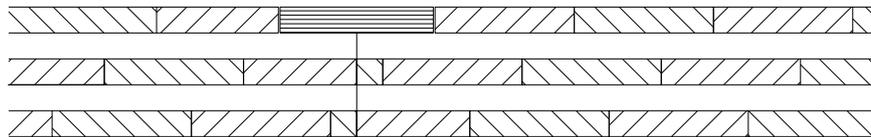
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-------------|----------|--|
| 17  | 156.3       | 1.5      |    |
| 18  | 166.8       | —        |   |
| 19  | 172.8       | —        |  |



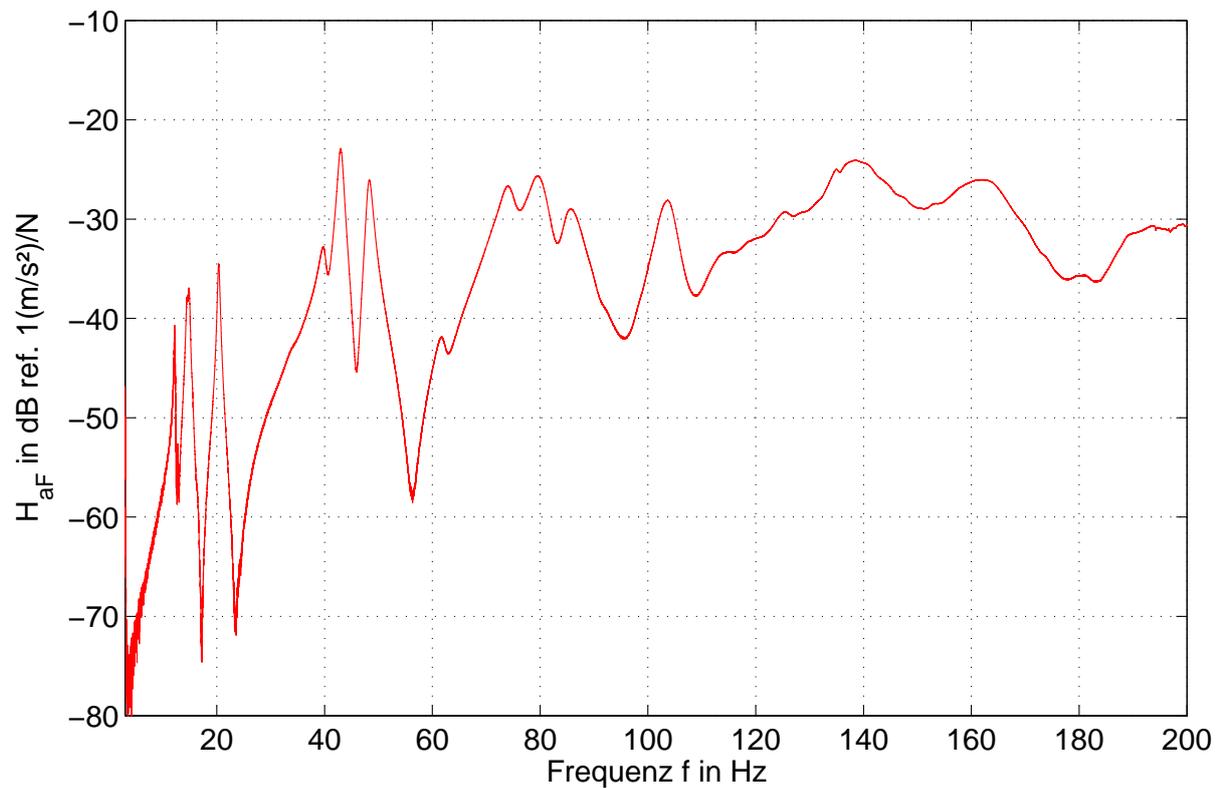
**Abbildung 4.14:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

#### 4.1.2.4 Leno162 vierseitig aufgelagert

Abb. 4.16 kann die Eingangsakzeleranz der vierseitig aufgelagerten Rohdecke aus Leno162 entnommen werden.



**Abbildung 4.15:** Aufbau der gemessenen Struktur. Vier Elemente aus Leno162, verbunden mit Kerto Streifen. Spannweite 5.5 m Breite 5.5 m

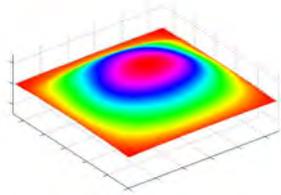
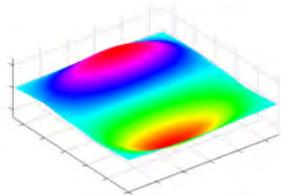
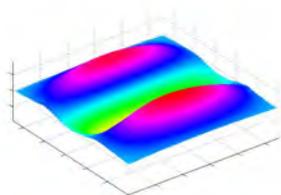
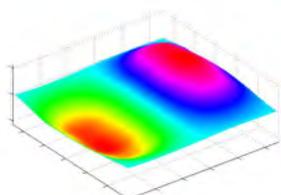
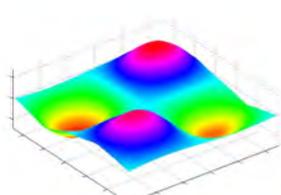


**Abbildung 4.16:** Eingangsakzeleranz der vierseitig gelagerten Rohdecke aus vier Leno162-Elementen ohne zusätzliche Ausbauten.

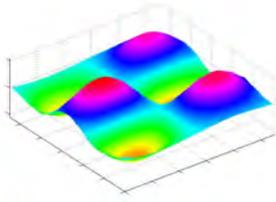
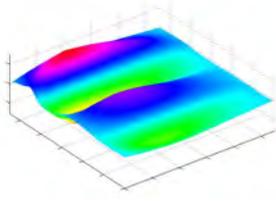
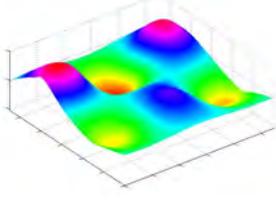
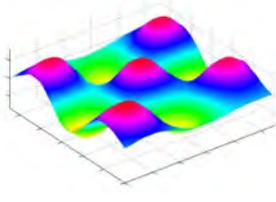
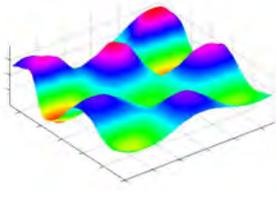
Tabelle 4.6 listet die Resonanzfrequenzen mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen der zweiseitig aufgelagerten Decke aus Leno105 auf. Die Maxima

der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.17 entnommen werden.

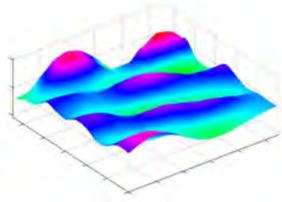
**Tabelle 4.6:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162, vierseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform

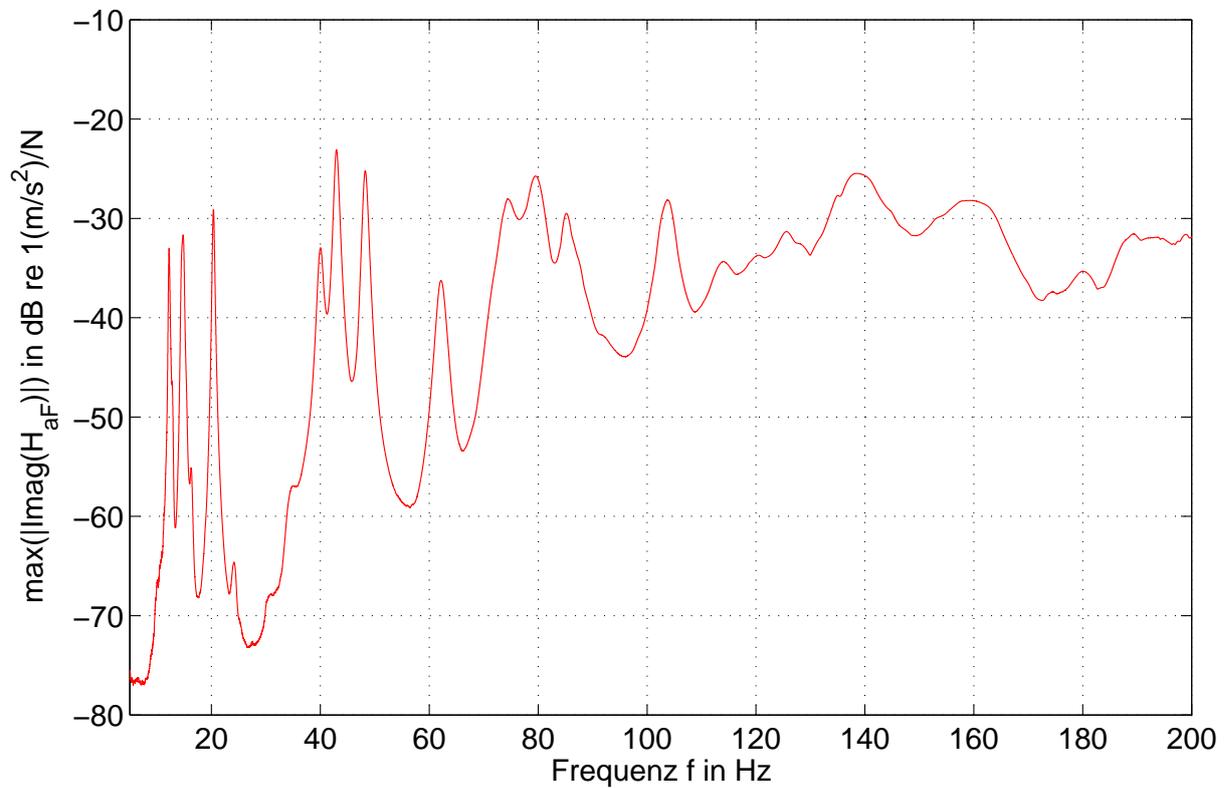
| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 1   | 12,2      | 0,7      |    |
| 2   | 14,8      | 1,1      |    |
| 3   | 20,4      | 0,8      |  |
| 4   | 40,0      | 1,2      |  |
| 5   | 43,0      | 0,8      |  |

**Tabelle 4.6:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162, vierseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-----------|----------|--|
| 6   | 48,3      | 0,8      |    |
| 7   | 62,1      | 1,4      |    |
| 8   | 79,6      | 2,0      |   |
| 9   | 85,4      | 2,0      |  |
| 10  | 103,8     | 1,3      |  |

**Tabelle 4.6:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162, vierseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 11  | 138,6     | 3,3      |  |

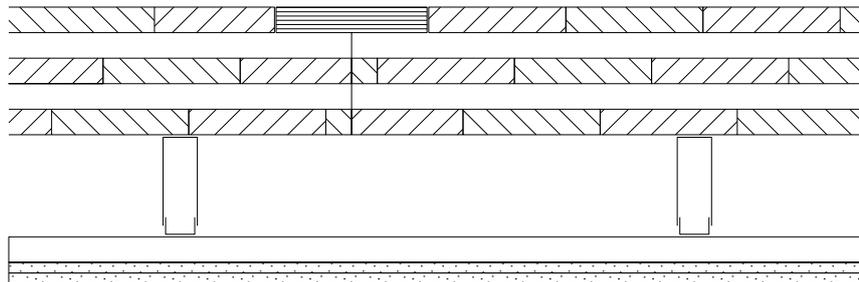


**Abbildung 4.17:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

### 4.1.3 Rohdecke mit Unterdecke

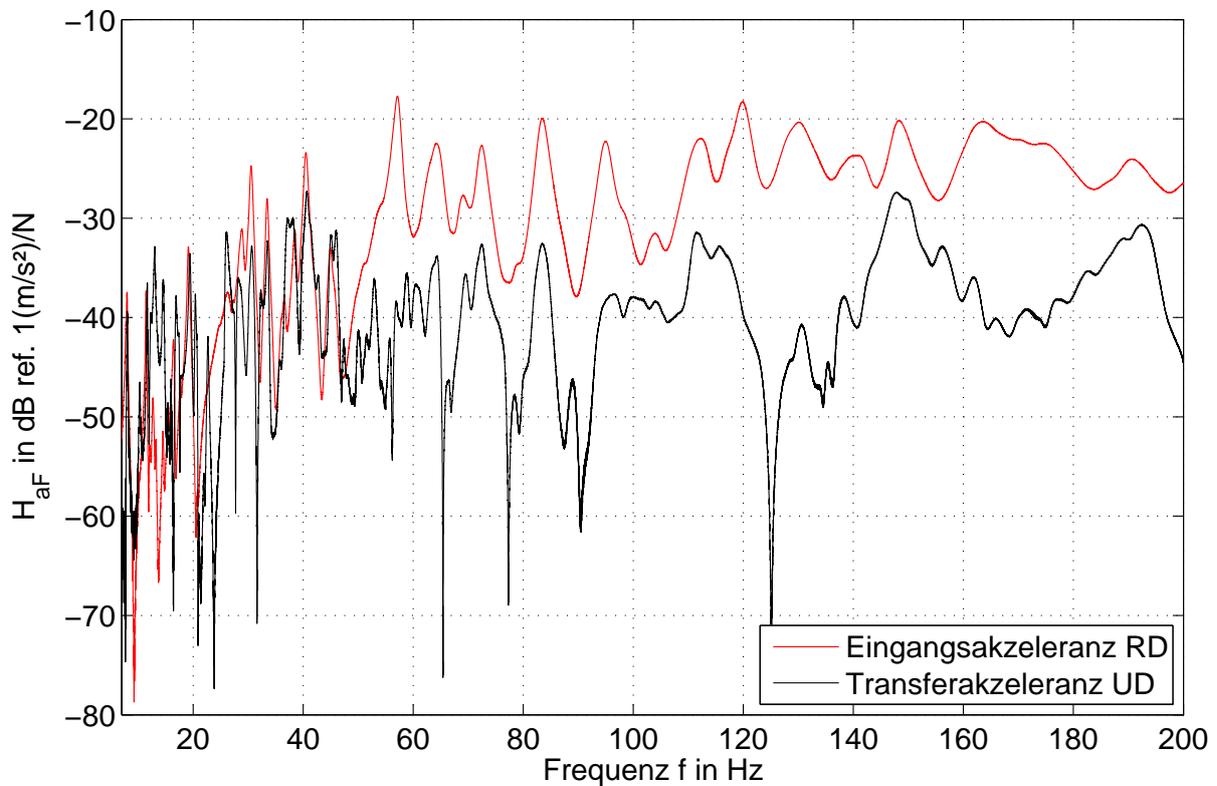
Die zweiseitig aufgelagerten Rohdecken aus Leno105 und Leno162 werden jeweils mit einer abgehängten Unterdecke versehen und eine Betriebsschwinganalyse von beiden Lagen sowie eine Messung der abgestrahlten Schalleistung unter der Rohdecke durchgeführt.

#### 4.1.3.1 Leno105 Rohdecke mit Unterdecke



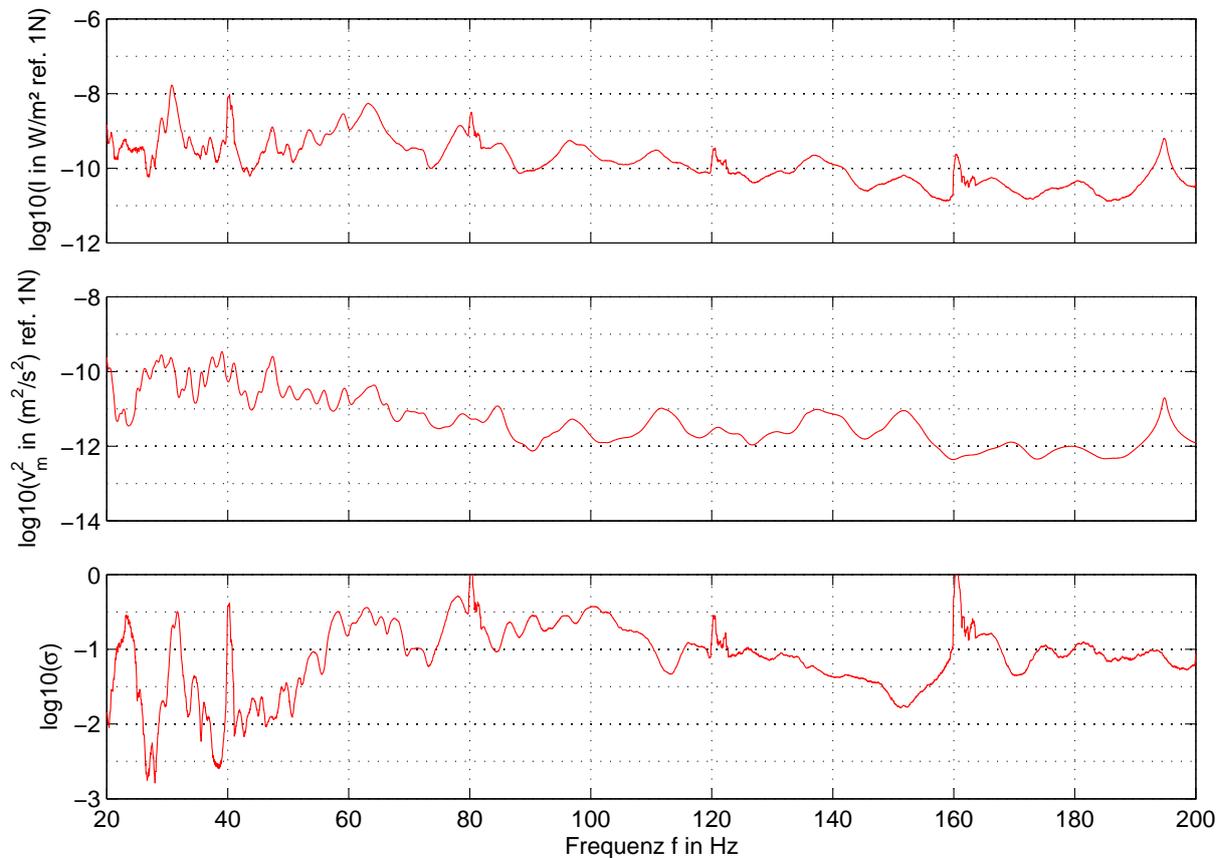
**Abbildung 4.18:** Aufbau der gemessenen Struktur. Rohdecke aus Leno105 mit abgehängter Unterdecke.  
Spannweite 5.5 m Breite 5.5 m.

In Abb. 4.19 ist die Eingangsakzeleranz der Rohdecke sowie die Transferakzeleranz vom Anregungspunkt direkt zu dem darunter liegenden Punkt der Unterdecke abgebildet. Bei ca. 15 Hz ist eine deutliche Differenz zwischen den Verläufen der Akzeleranzen zu erkennen. Die Amplituden unterscheiden sich jedoch erst oberhalb von ca. 50 Hz. Eine genauere Untersuchung zur Kopplung der Rohdecke und der Unterdecke findet sich in Kapitel 4.1.5.



**Abbildung 4.19:** Eingangszkzeleranz der Rohdecke aus Leno105 mit Unterdecke und Transferakzeleranz vom Anregungspunkt zur Unterdecke an gleicher x,y-Position.

Die Ergebnisse der Messung der abgestrahlten Schallintensität und der Oberflächenschnelle sind in Abb. 4.20 zusammengefasst. Die drei Diagramme zeigen die abgestrahlte Schallintensität  $I$ , referenziert auf die eingeleitete Kraft  $F$ , das mittlere Schnellequadrat  $v^2$  auf der Oberfläche der Unterdecke und den daraus resultierenden Abstrahlgrad  $\sigma$  der Unterdecke.



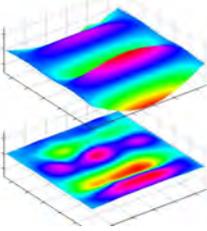
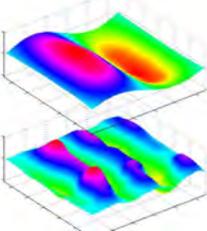
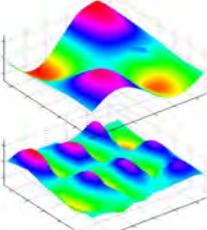
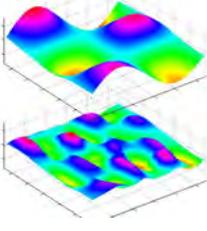
**Abbildung 4.20:** Abgestrahlte Schallintensität, mittleres Schnellequadrat der Unterdecke und Abstrahlgrad  $\sigma$  unter Leno105 Decke mit Unterdecke. Intensität und mittleres Schnellequadrat sind auf die eingeleitete Kraft  $F$  in N referenziert.

Tabelle 4.7 listet die Resonanzfrequenzen der Leno105-Decke mit abgehängter Unterdecke mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.21 entnommen werden.

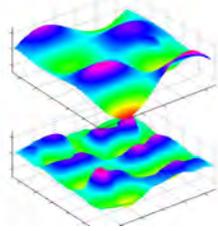
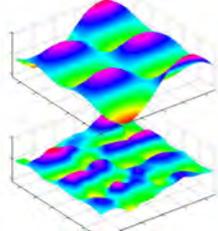
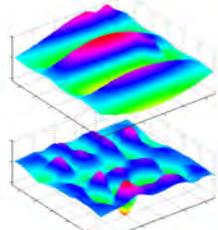
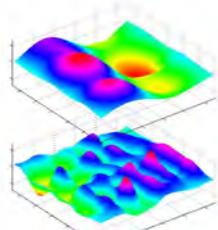
**Tabelle 4.7:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105 mit Unterdecke mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-------------|----------|-------------------------|
| 1   | 7.8         | –        |                         |
| 2   | 8.0         | 1.0      |                         |
| 3   | 11.5        | 0.4      |                         |
| 4   | 16.5        | 0.7      |                         |

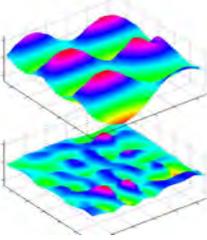
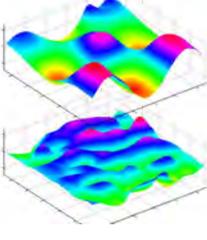
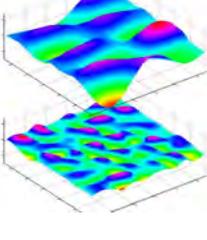
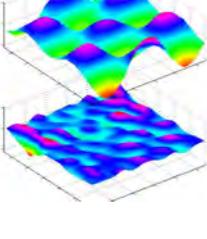
**Tabelle 4.7:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105 mit Unterdecke mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 5   | 19.2        | 0.6      |    |
| 6   | 26.6        | 1.3      |   |
| 7   | 30.6        | 0.7      |  |
| 8   | 33.5        | 0.5      |  |

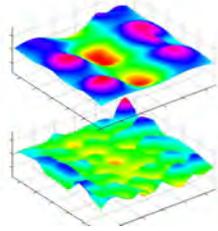
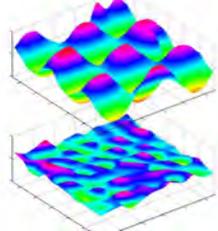
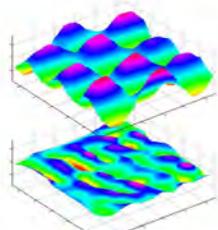
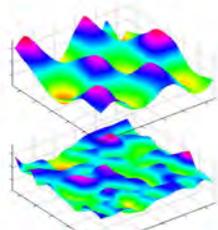
**Tabelle 4.7:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105 mit Unterdecke mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

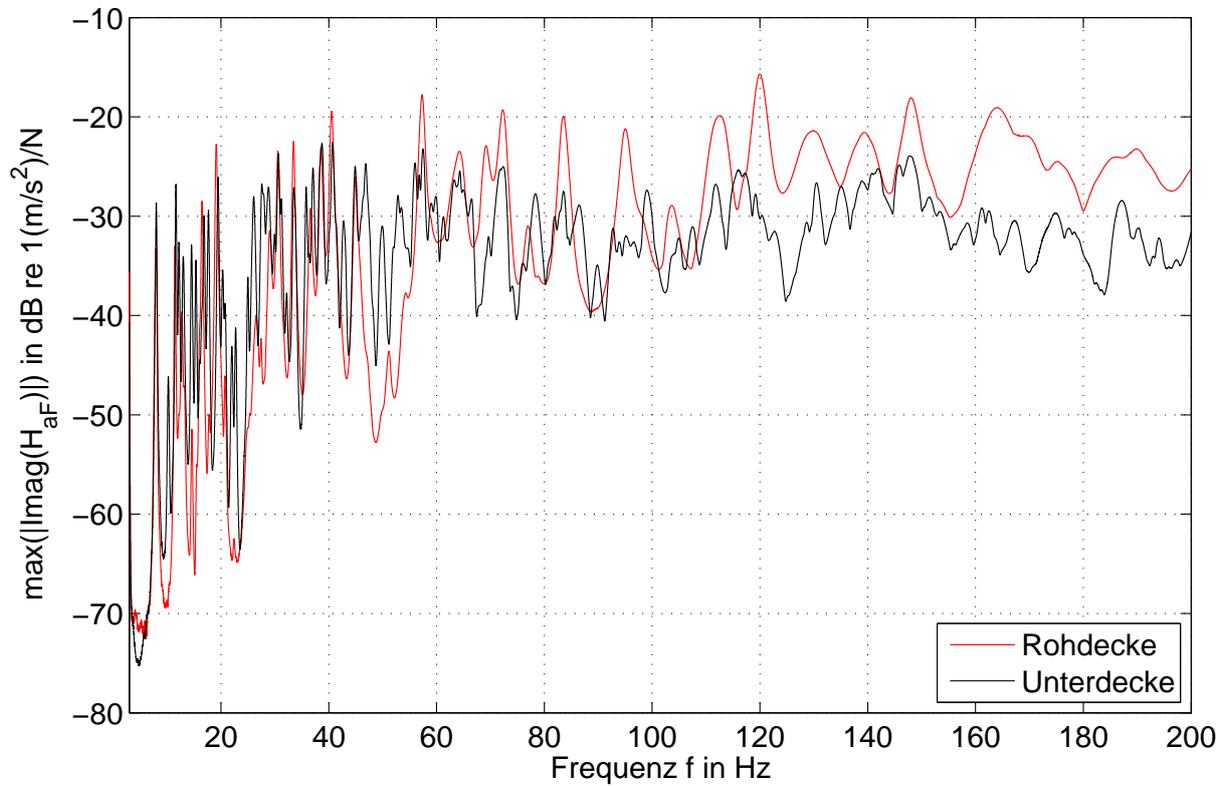
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 9   | 38.6        | 0.6      |    |
| 10  | 40.5        | 0.6      |   |
| 11  | 45.0        | 0.7      |  |
| 12  | 51.2        | 1.3      |  |

**Tabelle 4.7:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105 mit Unterdecke mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 13  | 57.2        | 0.7      |    |
| 14  | 64.2        | 1.4      |   |
| 15  | 69.1        | 1.7      |  |
| 16  | 72.3        | 1.0      |  |

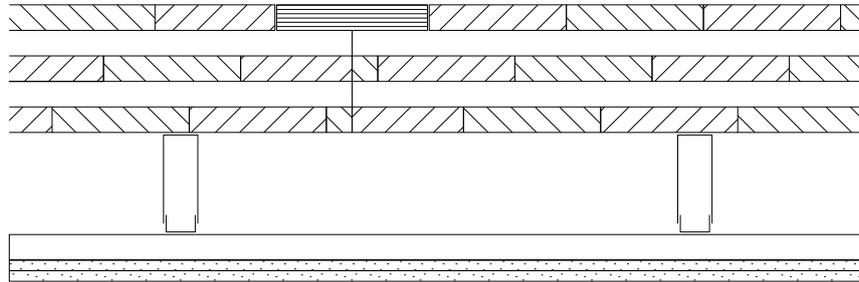
**Tabelle 4.7:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno105 mit Unterdecke mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 17  | 79.0        | –        |    |
| 18  | 83.4        | 0.8      |   |
| 19  | 95.0        | 1.0      |  |
| 20  | 104.0       | 2.5      |  |



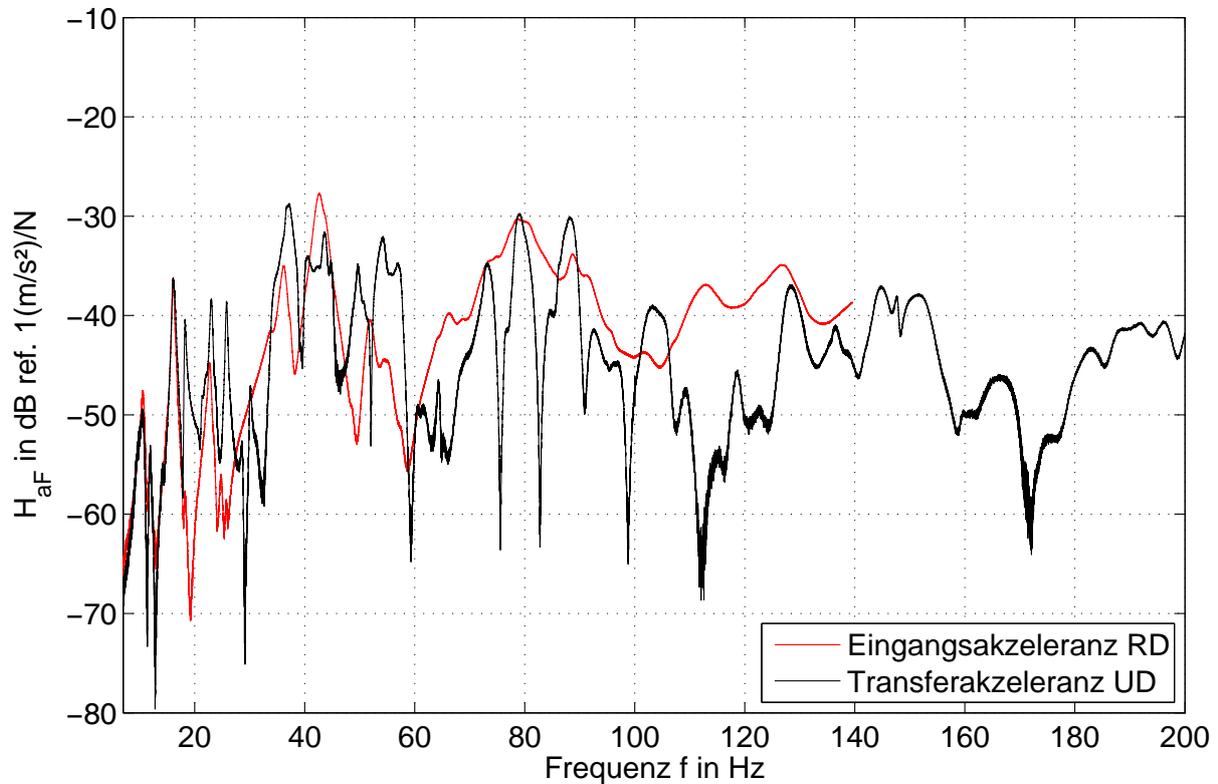
**Abbildung 4.21:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

#### 4.1.3.2 Leno162 Rohdecke mit Unterdecke



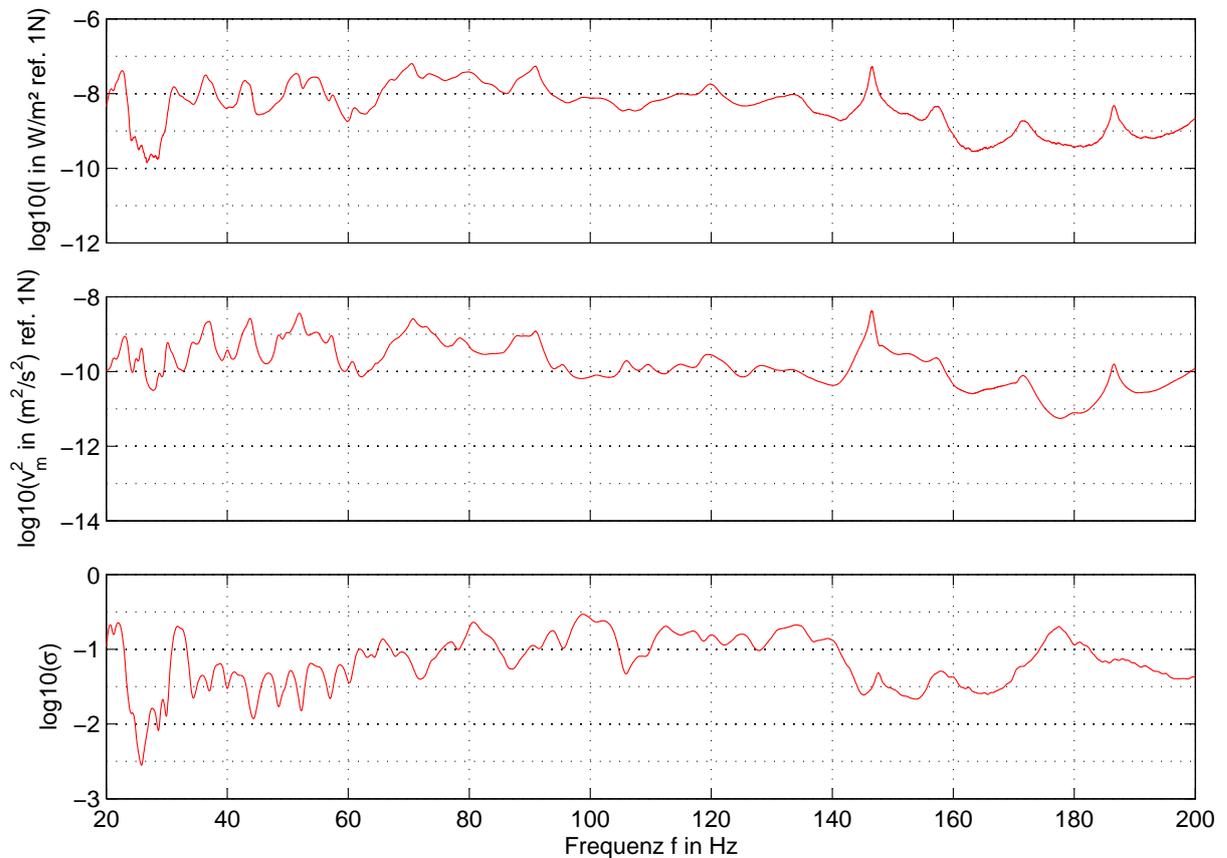
**Abbildung 4.22:** Aufbau der gemessenen Struktur. Rohdecke aus Leno162 mit abgehängter Unterdecke.  
 Spannweite 5.5 m Breite 2.75 m.

In Abb. 4.19 ist die Eingangsakzeleranz der Rohdecke sowie die Transferakzeleranz vom Anregungspunkt direkt zu dem darunter liegenden Punkt der Unterdecke abgebildet.



**Abbildung 4.23:** Eingangsakzeleranz der Rohdecke aus Leno162 mit Unterdecke und Transferakzeleranz vom Anregungspunkt zur Unterdecke an gleicher x,y-Position. Eine Auswertung der Eingangsakzeleranz der Rohdecke ist oberhalb von 140  $Hz$  nicht möglich.

Die Ergebnisse der Messung der abgestrahlten Schallintensität  $I$  und des mittleren Schnellquadrates  $v^2$  auf der Oberfläche sind in Abb. 4.24 zusammengefasst.



**Abbildung 4.24:** Abgestrahlte Schallintensität, mittleres Schnellequadrat der Unterdecke und Abstrahlgrad  $\sigma$  unter Leno162 Decke mit Unterdecke. Intensität und mittleres Schnellequadrat sind auf die eingeleitete Kraft  $F$  in N referenziert. Das Maximum im Verlauf von  $I$  und  $v^2$  bei ca. 145 Hz wird durch freie Biegeeigenformen der Gipskartonplatten zwischen den Metallschienen bedingt.

Tabelle 4.8 listet die Resonanzfrequenzen der Leno162-Decke mit abgehängter Unterdecke mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.25 entnommen werden.

**Tabelle 4.8:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162 mit Unterdecke mit modalen Dämpfungswerten aus ME<sup>3</sup>SCOPE<sup>®</sup> und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke)

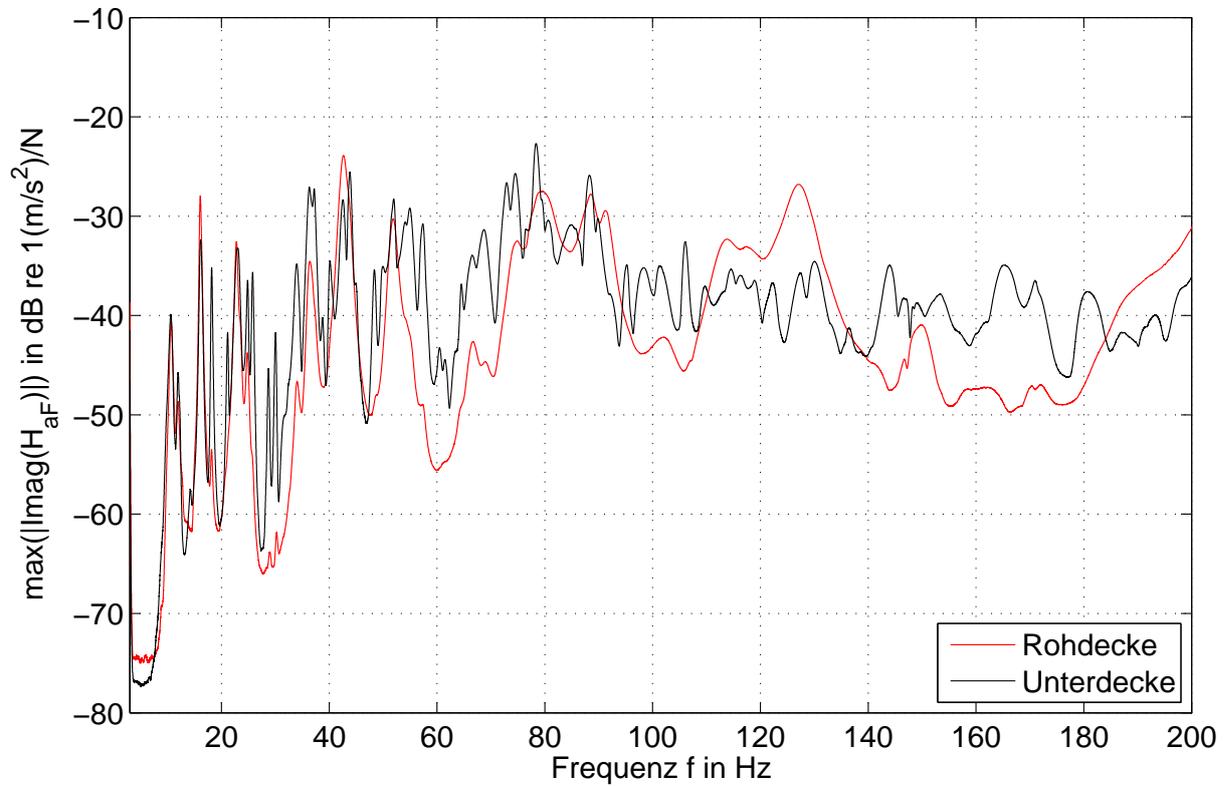
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-------------|----------|-------------------------|
| 1   | 10.7        | 3.5      |                         |
| 2   | 11.9        | 2.0      |                         |
| 3   | 16.1        | 1.5      |                         |
| 4   | 18.1        | 1.1      |                         |
| 5   | 22.8        | 1.6      |                         |

**Tabelle 4.8:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162 mit Unterdecke mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke)

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-------------|----------|-------------------------|
| 6   | 23.6        | 1.6      |                         |
| 7   | 25.0        | 1.5      |                         |
| 8   | 35.8        | 0.5      |                         |
| 9   | 36.7        | 3.1      |                         |
| 10  | 42.7        | 2.4      |                         |

**Tabelle 4.8:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162 mit Unterdecke mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke)

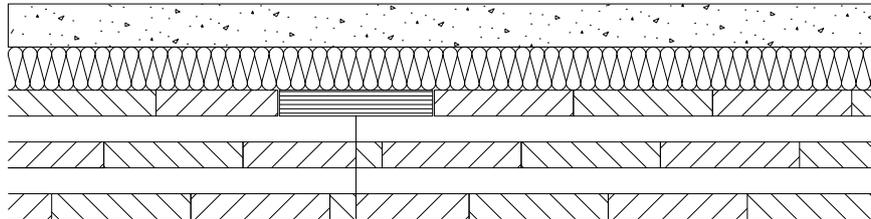
| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|----------|-------------------------|
| 11  | 51.0      | —        |                         |
| 12  | 80.0      | —        |                         |
| 13  | 126.0     | —        |                         |
| 14  | 144.6     | —        |                         |



**Abbildung 4.25:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

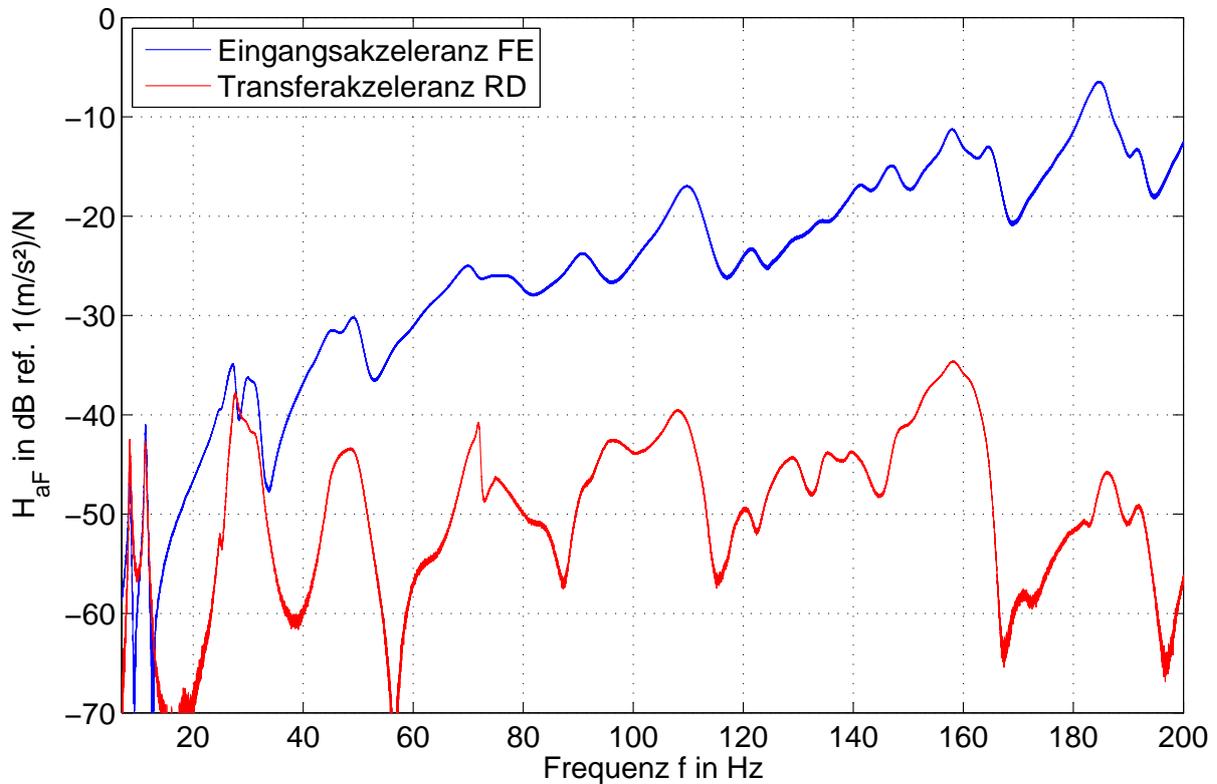
## 4.1.4 Rohdecke mit schwimmenden Estrichaufbauten

### 4.1.4.1 Leno162-Rohdecke mit Fließestrich



**Abbildung 4.26:** Aufbau der gemessenen Struktur. Rohdecke aus Leno162 mit Fließestrich. Spannweite 5.5 m Breite 2.75 m.

In Abb. 4.27 ist die Eingangsakzeleranz des Fließestrich sowie die Transferakzeleranz vom Anregungspunkt direkt zu dem darunter liegenden Punkt der Rohdecke abgebildet. Oberhalb von ca. 50 Hz ist die Entkopplung zwischen dem Estrich und der Rohdecke zu erkennen. Genauere Untersuchungen hierzu finden sich in Kapitel 4.1.5.



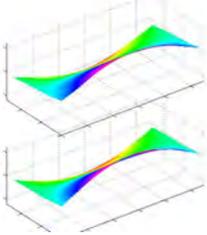
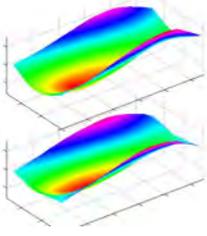
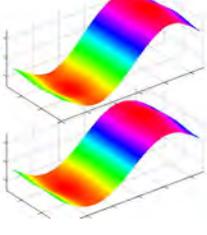
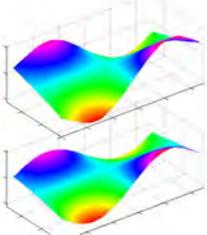
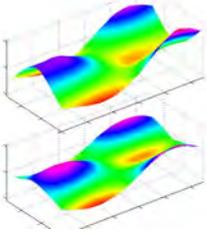
**Abbildung 4.27:** Eingangsakzeleranz des angeregten Fließestrich und Transferakzeleranz vom Anregungspunkt zur Rohdecke an gleicher x,y-Position.

Tabelle 4.9 listet die Resonanzfrequenzen der Leno162-Decke mit Fließestrich mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.28 entnommen werden.

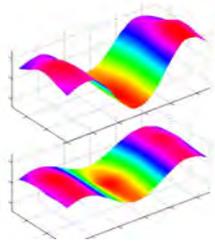
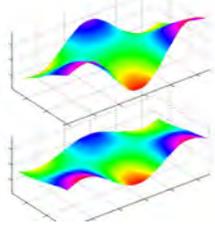
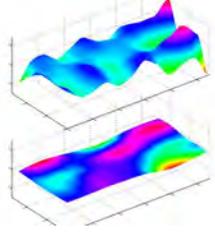
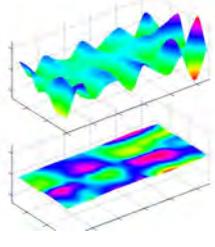
**Tabelle 4.9:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162 mit Fließestrich mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (oben Fließestrich, unten Rohdecke)

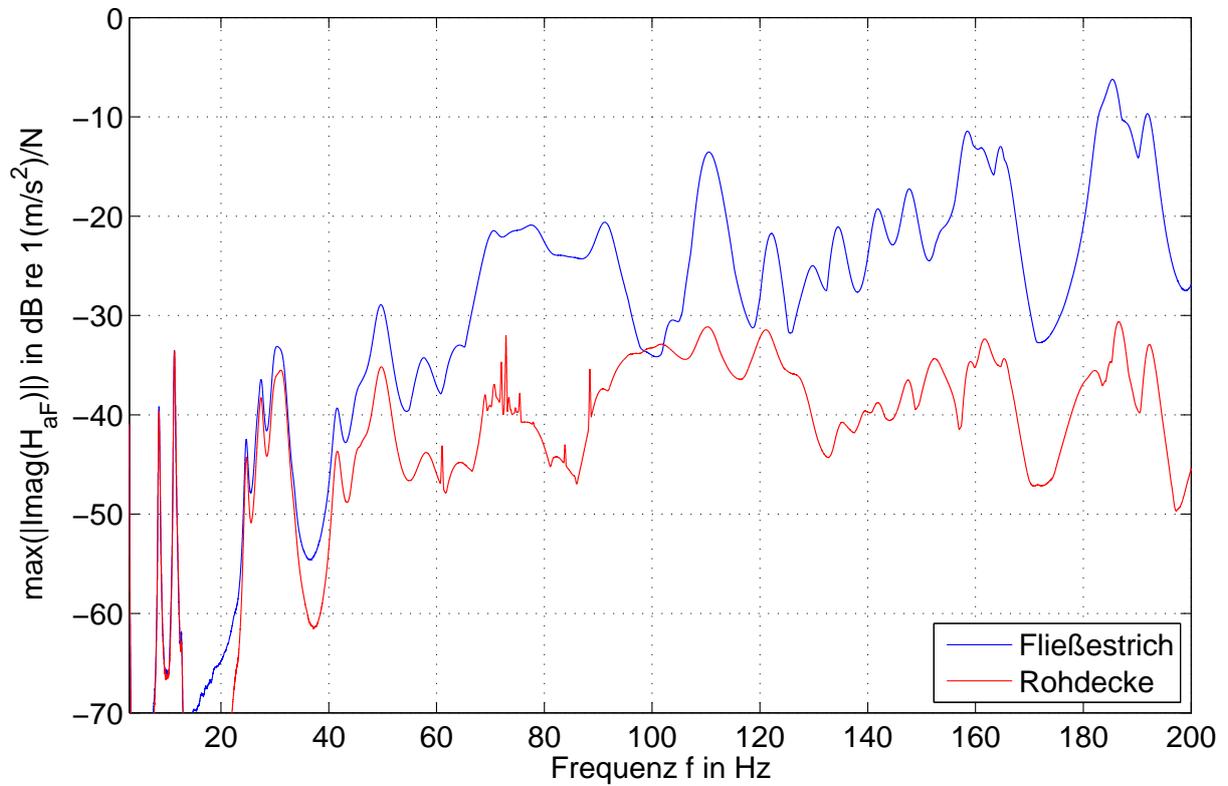
| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|----------|-------------------------|
| 1   | 8.5       | 1.7      |                         |

**Tabelle 4.9:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162 mit Fließestrich mit modalen Dämpfungswerten aus ME<sup>3</sup>SCOPE<sup>®</sup> und Betriebsschwingungsform (oben Fließestrich, unten Rohdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 2   | 11.4      | 1.5      |    |
| 3   | 24.7      | 1.6      |    |
| 4   | 27.5      | 2.9      |  |
| 5   | 30.9      | —        |  |
| 6   | 41.6      | 2.4      |  |

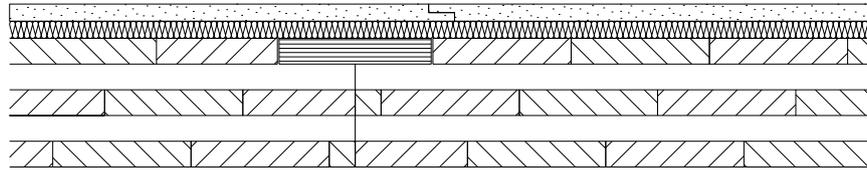
**Tabelle 4.9:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162 mit Fließestrich mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (oben Fließestrich, unten Rohdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 7   | 45.4      | —        |    |
| 8   | 49.7      | —        |    |
| 9   | 108.7     | —        |  |
| 10  | 158.4     | —        |  |



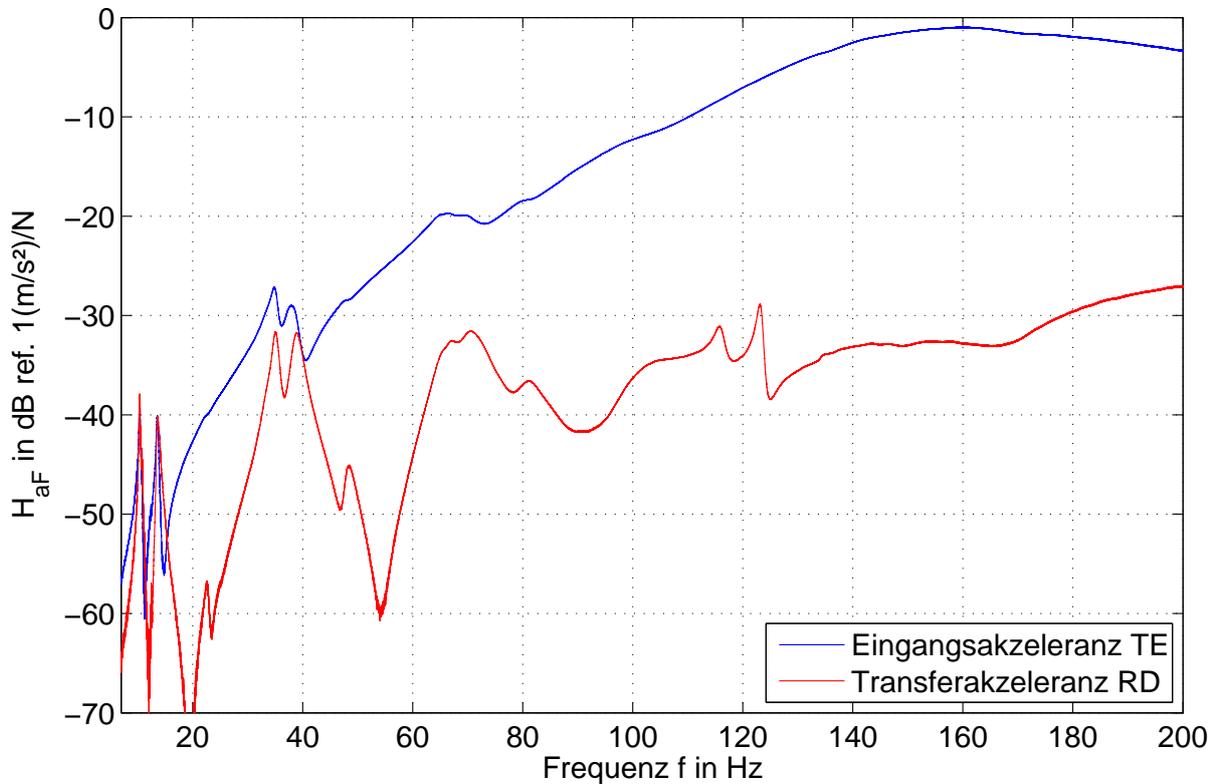
**Abbildung 4.28:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

#### 4.1.4.2 Leno162-Rohdecke mit Trockenestrich



**Abbildung 4.29:** Aufbau der gemessenen Struktur. Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich. Spannweite 5.5 m Breite 2.75 m.

In Abb. 4.30 ist die Eingangsakzeleranz des Trockenestrichs sowie die Transferakzeleranz vom Anregungspunkt direkt zu dem darunter liegenden Punkt der Rohdecke abgebildet. Oberhalb von ca. 50 Hz ist die Entkopplung der beiden Strukturen zu erkennen. Weitere Untersuchungen in Kapitel 4.1.5 bestätigen dies. Im Vergleich zum Verlauf der Eingangsakzeleranz beim Fließestrich sind bei der des Trockenestrichs kaum mehr einzelne Maxima zu erkennen. Bei den Betriebsschwingformen oberhalb von 70 Hz ist an der Stelle der Anregung auch eine deutliche lokale Überhöhung erkennbar. Auf Grund der geringen Biegesteifigkeit des Estriches ist die seitliche Lastverteilung reduziert.



**Abbildung 4.30:** Eingangsakzeleranz des angeregten Trockenestrich und Transferakzeleranz vom Anregungspunkt zur Rohdecke an gleicher x,y-Position.

Tabelle 4.10 listet die Resonanzfrequenzen der Leno162-Decke mit Trockenestrich mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.31 entnommen werden.

**Tabelle 4.10:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (oben Trockenestrich, unten Rohdecke)

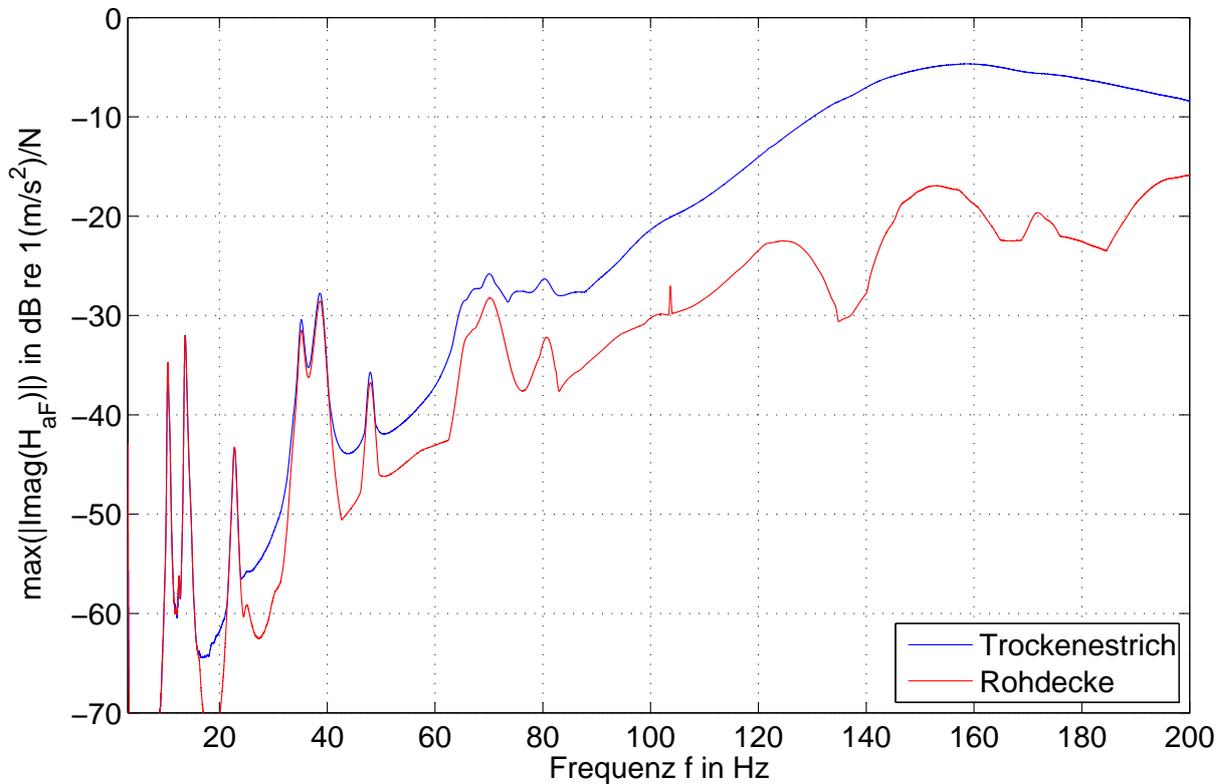
| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|----------|-------------------------|
| 1   | 10.4      | 1.9      |                         |

**Tabelle 4.10:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich mit modalen Dämpfungswerten aus ME<sup>SCOPE</sup>® und Betriebsschwingungsform (oben Trockenestrich, unten Rohdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|----------|-------------------------|
| 2   | 13.6      | 2.2      |                         |
| 3   | 22.8      | 2.7      |                         |
| 4   | 35.2      | 2.6      |                         |
| 5   | 38.6      | 3.4      |                         |
| 6   | 48.0      | 2.2      |                         |

**Tabelle 4.10:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Leno162 mit Trockenstrich mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (oben Trockenstrich, unten Rohdecke)

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-------------|----------|-------------------------|
| 7   | 70.4        | —        |                         |
| 8   | 81.7        | —        |                         |
| 9   | 123.1       | —        |                         |
| 10  | 135.9       | —        |                         |



**Abbildung 4.31:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

Der Vergleich zwischen den Resonanzfrequenzen des Deckenaufbaus mit dem Fließestrich und desjenigen mit dem Trockenestrich zeigt einen deutlichen Einfluss der höheren Masse des Fließestrichs auf die Lage der Resonanzen. Diese liegen bei dem Aufbau mit Fließestrich deutlich tiefer verglichen zum Aufbau mit Trockenestrich. Anhand des Verlaufes der Akzeleranzen lässt sich erkennen, dass der Fließestrich deutlich schwerer anzuregen ist, die Akzeleranz der Rohdecke jedoch im Vergleich zum Aufbau mit Trockenestrich nur geringfügig kleiner ist.

#### 4.1.5 Rohdecke mit Unterdecke und Estrich

Bei Aufbauten mit schwimmenden Estrich und abgehängter Unterdecke können auf der Rohdecke keine Beschleunigungsaufnehmer direkt befestigt werden. Um dennoch Messungen der Beschleunigungen der Rohdecke durchführen zu können, wird der schwimmende Estrich an den Messpunkten mit Bohrungen versehen und Holzschrauben durch diese Bohrungen in die Rohdecke geschraubt (s. Abb. 4.32). Die Schrauben haben keinen Kontakt zum Estrich. Auf den Schraubenköpfen werden die Beschleunigungsaufnehmer mit Hilfe von Magnetbefestigungen angebracht. Vergleichsmessungen direkt auf der Rohdecke und auf daneben platzierten Schrauben zeigen, dass die Schraube im Frequenzbereich unter  $200\text{ Hz}$  keinen Einfluss auf das Messergebnis hat. Ebenso wird die Eingangszeleranz des schwimmenden Estrichs mit und ohne Bohrungen gemessen, was nur eine geringe Verstimmung zur Folge hat [58].



**Abbildung 4.32:** Positionierung einer Schraube in der Rohdecke durch eine Bohrung im Estrich. Messung der Rohdeckenbeschleunigung durch magnetisch befestigten Beschleunigungsaufnehmer auf dem Schraubenkopf. Beschleunigungsmessung des Estrichs durch Platzierung des Aufnehmers mittels eines Magneten auf der mit dem Estrich verklebten Karosseriescheibe.

Der beschriebene Messaufbau ermöglicht es, alle drei Lagen der Deckenkonstruktion mit Unterdecke und schwimmenden Estrich ohne Veränderungen des Gesamtaufbaus zu messen und die Betriebsschwingungsformen übereinander mit korrekter Phasenverschiebung darzustellen. Um die Betriebsschwingungsformen des Estrichs und der Unterdecke mit denen der Rohdecke zu vergleichen, wird das Model-Assurance-Criterion (MAC) [2] verwendet. Dies entspricht einem zweidimensionalen Kreuzkorrelationskoeffizienten der Betriebsschwingungsformen. Der MAC-Koeffizient wird frequenzabhängig für die Betriebsschwingungsformen der Rohdecke im

Vergleich zur Unterdecke und im Vergleich zum Estrich berechnet.

$$MAC(f) = \frac{|\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \Psi_1(f, i, j) \cdot \Psi_2^*(f, i, j)|^2}{(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \Psi_1(f, i, j) \cdot \Psi_1^*(f, i, j)) \cdot (\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \Psi_2(f, i, j) \cdot \Psi_2^*(f, i, j))} \quad (4.1)$$

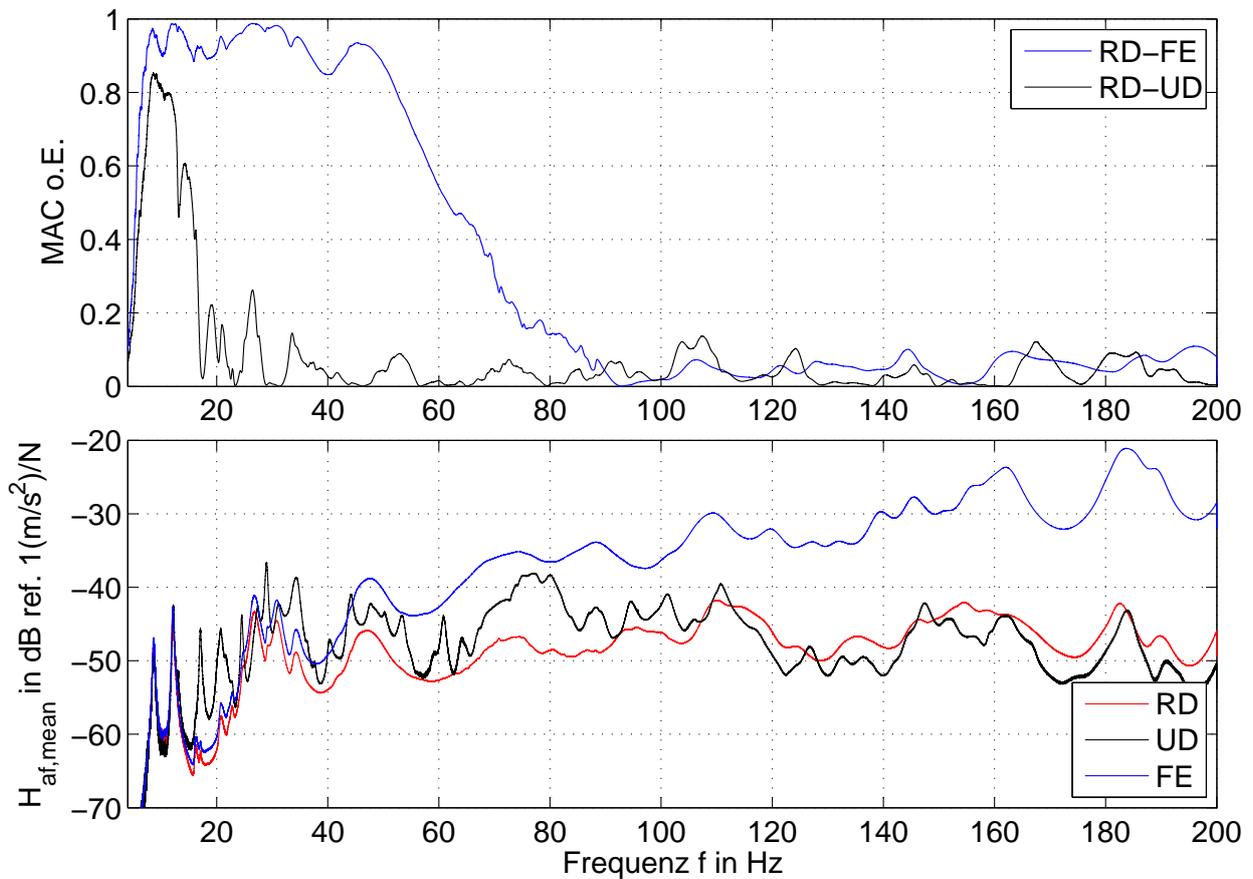
$N_x, N_y$ : Nummer der Messpunkte in x, y-Richtung

$\Psi_1, \Psi_2$ : zweidimensionale komplexe Transferakzeleranzen der Lagen 1,2

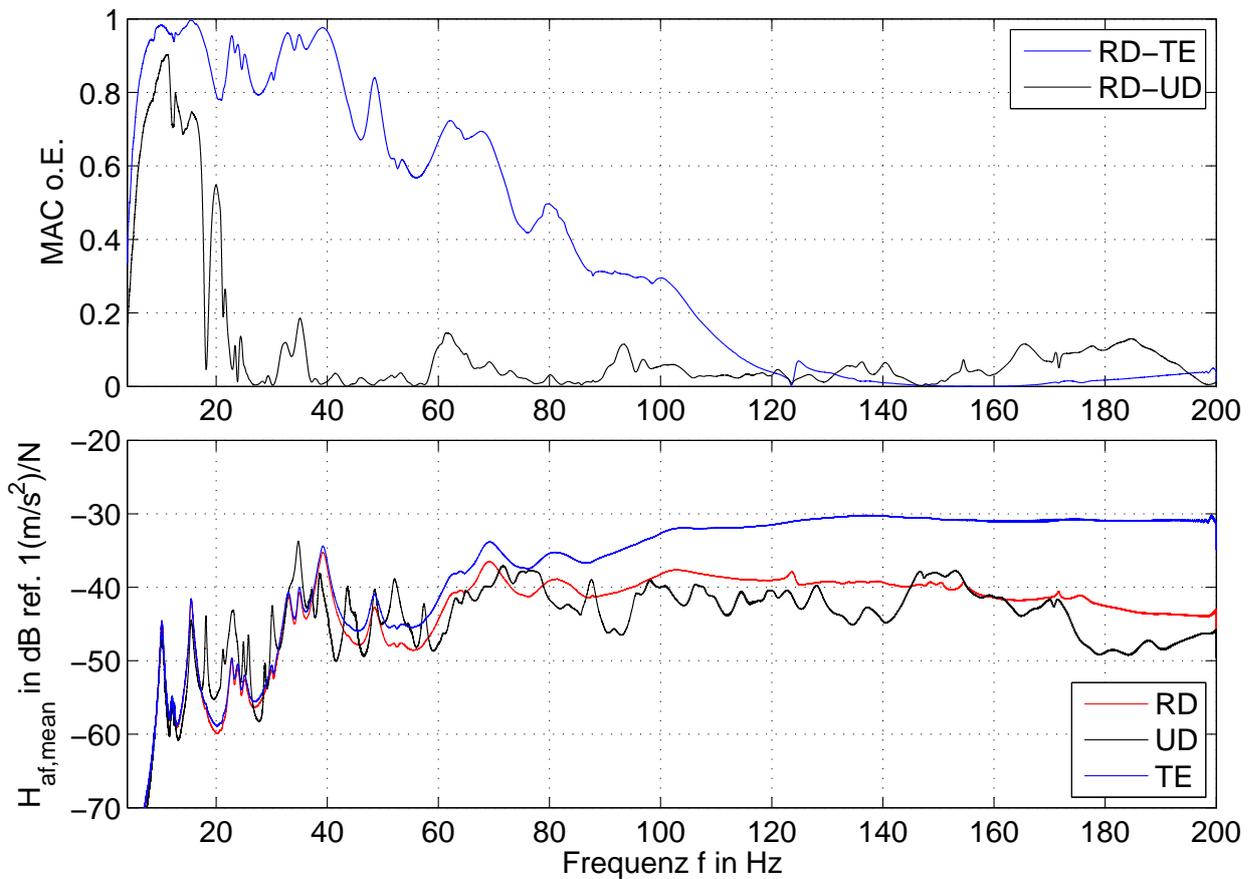
Berechnungen zum **MAC** werden für die Kombination der Rohdecke aus Leno162 mit Unterdecke und je einem Fließestrich-Aufbau und einem Trockenestrich-Aufbau durchgeführt. Beide Decken sind in jeweils eine Hälfte des Prüfstandes eingebaut und haben somit Abmessungen von je  $5.5 \text{ m} \times 2.75 \text{ m}$ . In den Abbildungen 4.33 und 4.34 sind die Frequenzverläufe des **MAC** zwischen Estrich und Rohdecke und Unterdecke und Rohdecke und die gemittelten Beträge der Übertragungsfunktionen der Rohdecke, des Estrichs und der Unterdecke dargestellt.

In Abbildung 4.33 ist im oberen Diagramm deutlich der Bereich der Entkopplung zwischen Rohdecke und Unterdecke bei ca.  $16 \text{ Hz}$  und zwischen Rohdecke und Fließestrich bei ab ca.  $50 \text{ Hz}$  zu erkennen. In dem unteren Diagramm ist der Mittelwert der Beträge aller Transferakzeleranzen dargestellt. Hier sind die oben genannten Bereiche ebenfalls anhand der unterschiedlichen Verläufe der Transferakzeleranzen erkennbar. Unterhalb von ca.  $16 \text{ Hz}$  ist der Frequenzverlauf der drei Lagen beinahe identisch. Darüber ist ein deutlich abweichender Verlauf zwischen der Rohdecke und der Unterdecke zu erkennen. Zwischen  $20 \text{ Hz}$  und  $60 \text{ Hz}$  liegen die Kurven der Rohdecke und der Unterdecke zwar etwa im selben Bereich, es ist jedoch auch hier deutlich erkennbar, dass die einzelnen Maxima einen unterschiedlichen Verlauf haben. Der Effekt der Entkopplung ist bei den Transferakzeleranzen zwischen Rohdecke und Fließestrich ab ca.  $40 \text{ Hz}$  zu beobachten.

Abbildung 4.34 zeigt ein sehr ähnliches Verhalten des Deckenaufbaus mit einem Trockenestrich anstatt des Fließestrichs. Lediglich der Verlauf der **MAC**-Werte zwischen Rohdecke und Estrich ist hier nicht so steil wie derjenige zwischen Rohdecke und Fließestrich.

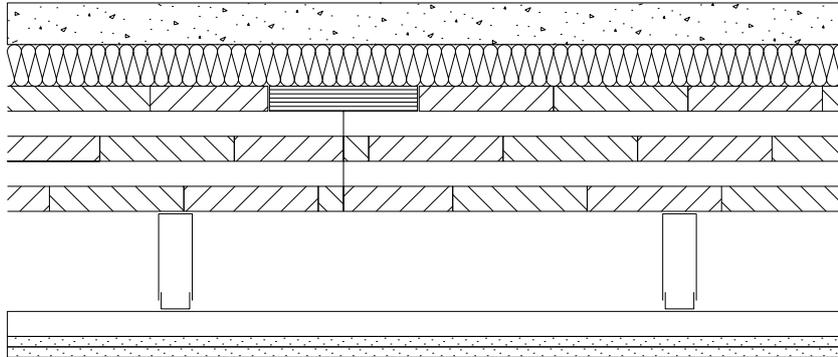


**Abbildung 4.33:** MAC des Deckenaufbaus aus Leno162 mit Unterdecke (UD) und Fließestrich (FE). Im oberen Diagramm ist die Korrelation der Betriebsschwingungsformen zwischen Rohdecke (RD) und Unterdecke bzw. Rohdecke und Estrich in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt. Im unteren Diagramm finden sich die flächengemittelten Betragswerte der Transferkzeleranzen der drei Lagen.



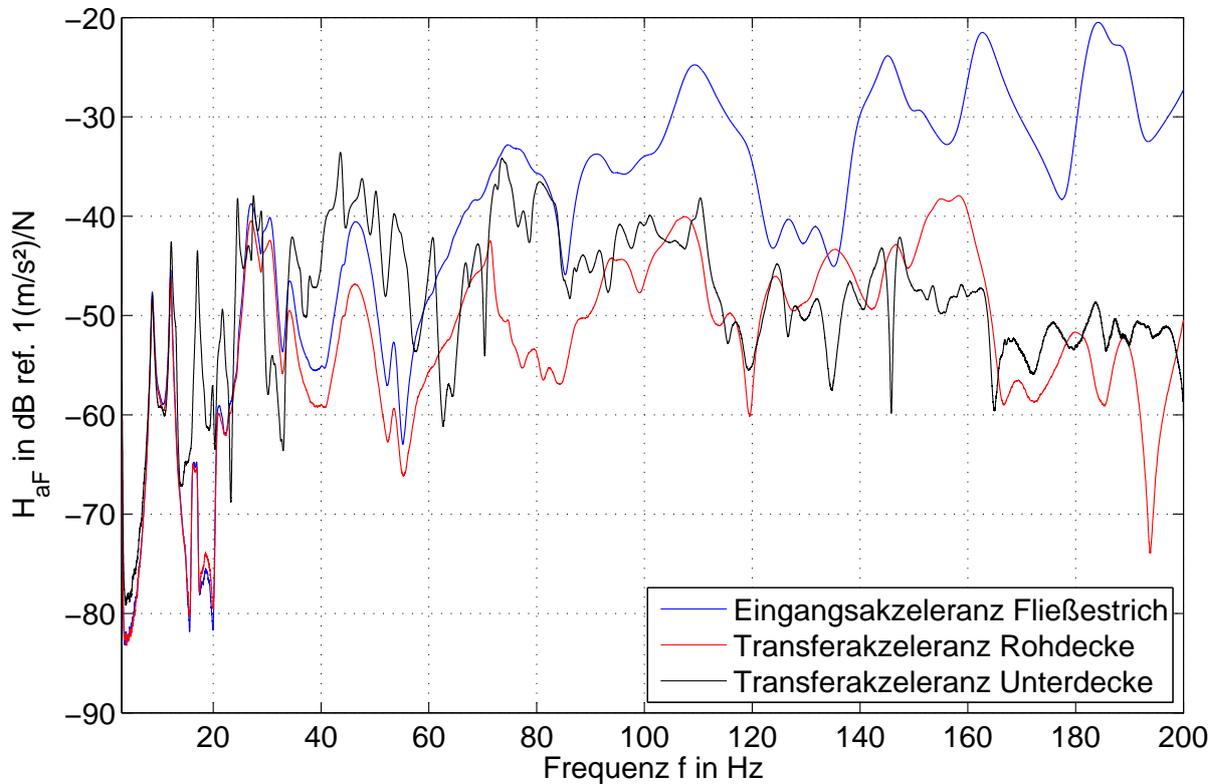
**Abbildung 4.34:** MAC des Deckenaufbaus aus Leno162 mit Unterdecke (UD) und Trockenestrich (TE) Darstellung wie in Abb. 4.33 beschrieben.

#### 4.1.5.1 Leno162 mit Fließestrich und Unterdecke



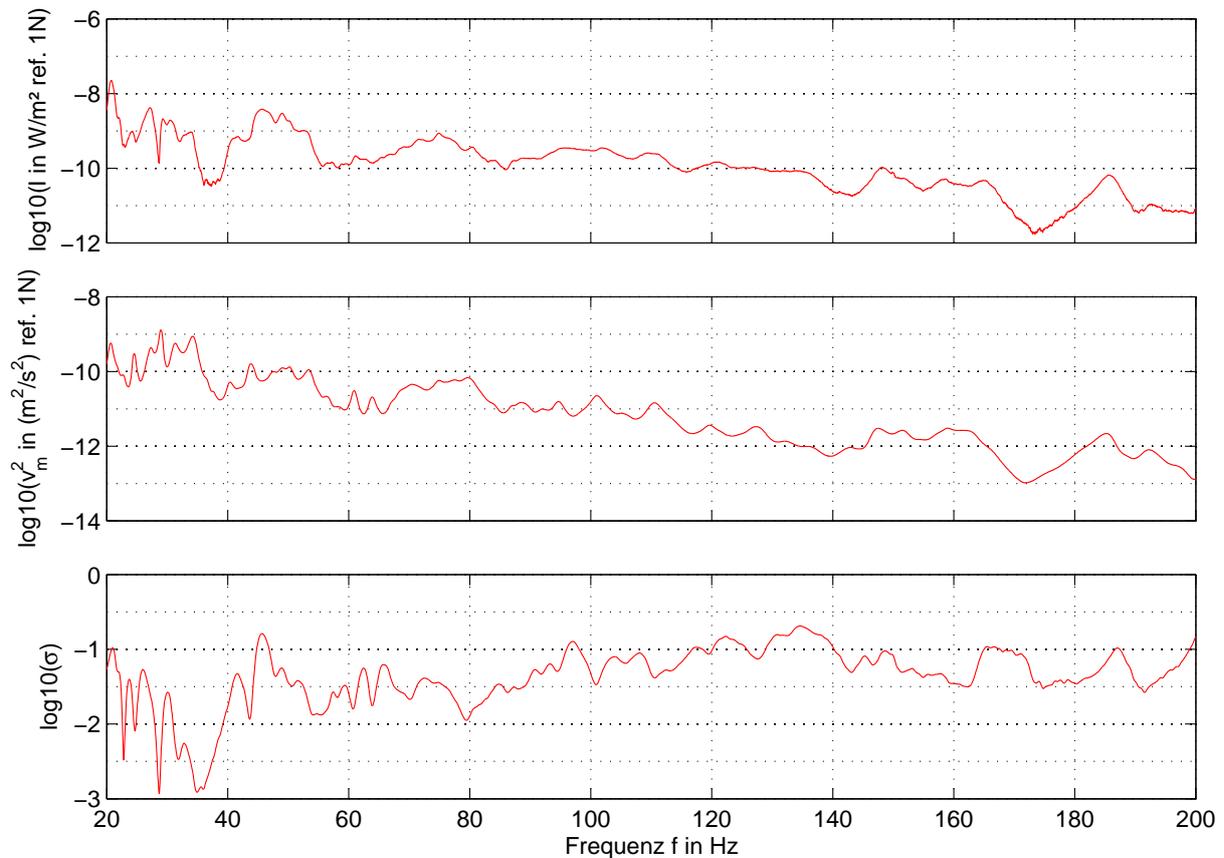
**Abbildung 4.35:** Aufbau der gemessenen Struktur. Vier Elemente aus Leno162, verbunden mit Kerto-Streifen. Spannweite  $l = 5.5 \text{ m}$  Breite  $b_{ges} = 5.5 \text{ m}$ . Fließestrich  $d = 5 \text{ cm}$  auf Trittschalldämmung  $d = 2 \text{ cm}$ . Abgehängte Unterdecke,  $2 \times 12.5 \text{ mm}$  GKP

Der Aufbau wird mit dem Schwingerreger an der Oberfläche des Fließestrichs angeregt. In Abb. 4.36 ist die Eingangsakzeleranz des Fließestrichs sowie die Transferakzeleranz vom Anregungspunkt direkt zu dem darunter liegenden Punkt der Rohdecke und der Unterdecke abgebildet.



**Abbildung 4.36:** Eingangszkzeleranz des Fließestrichs und Transferakzeleranzen zu Rohdecke und Unterdecke am Punkt der Anregung.

Die Ergebnisse der Messung der abgestrahlten Schallintensität  $I$  und des mittleren Schnellequadrates  $v^2$  auf der Oberfläche sind in Abb. 4.37 zusammengefasst.



**Abbildung 4.37:** Leno162 Rohdecke mit Unterdecke und Fließestrich; abgestrahlte Intensität, mittleres Schnellequadrat auf der Oberfläche der Unterdecke und Abstrahlgrad der Unterdecke

Tabelle 4.11 listet die Resonanzfrequenzen der Leno162-Decke mit Fließestrich und abgehängter Unterdecke mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.38 entnommen werden.

**Tabelle 4.11:** Rohdecke aus Leno162 mit Fließestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Fliessestrich}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1   | 8.7       | 2.6                    | 2.4                      | 2.6                         |                         |
| 2   | 12.2      | 1.4                    | 1.3                      | 1.3                         |                         |
| 3   | 13.1      | —                      | 2.0                      | —                           |                         |
| 4   | 16.1      | 1.7                    | 0.9                      | 1.3                         |                         |

**Tabelle 4.11:** Rohdecke aus Leno162 mit Fließestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

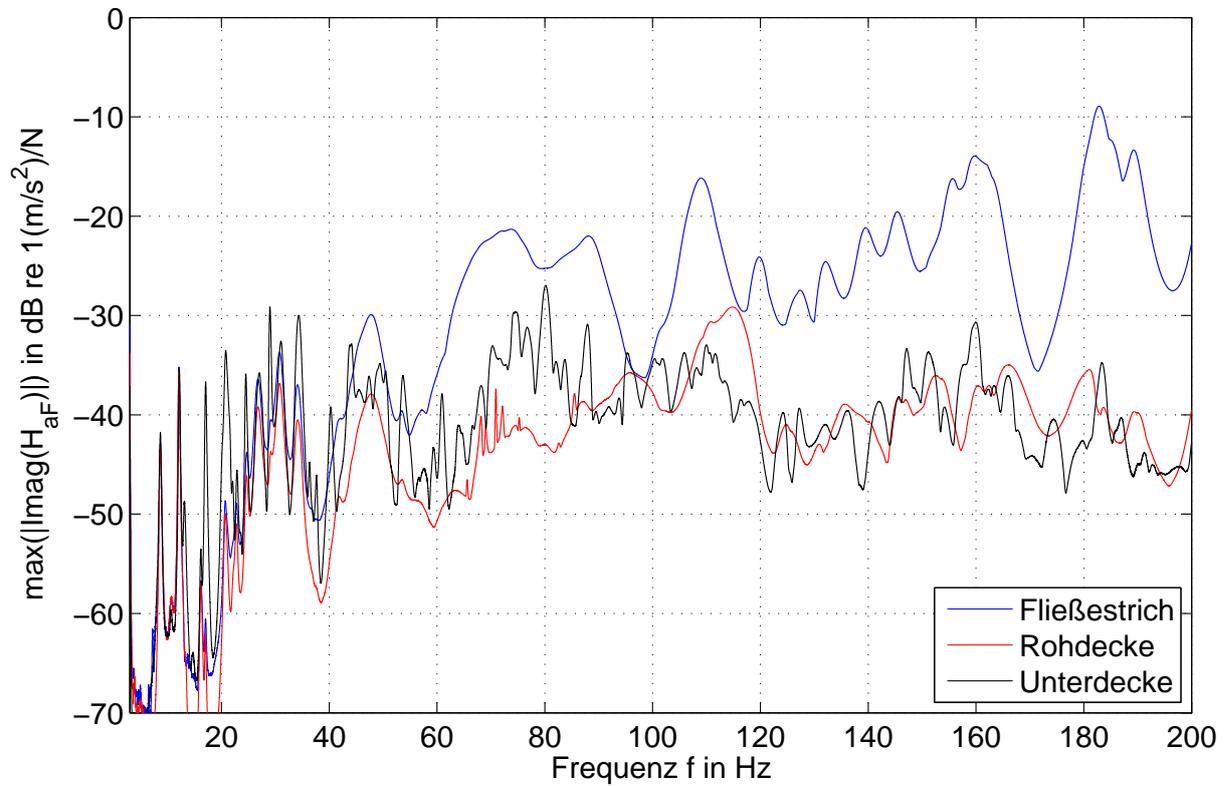
| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Fliessestrich}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 5   | 17.1      | 1.0                    | 1.1                      | 0.6                         |                         |
| 6   | 21.9      | —                      | 1.5                      | —                           |                         |
| 7   | 24.7      | 1.2                    | 0.7                      | 1.2                         |                         |
| 8   | 26.9      | 3.1                    | 3.2                      | 3.1                         |                         |

**Tabelle 4.11:** Rohdecke aus Leno162 mit Fließestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Fliessestrich}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 9   | 29.3      | 1.4                    | 0.9                      | 1.4                         |                         |
| 10  | 30.9      | 2.9                    | 2.1                      | 2.9                         |                         |
| 11  | 34.2      | 2.0                    | 2.1                      | 2.0                         |                         |
| 12  | 45.8      | —                      | —                        | —                           |                         |

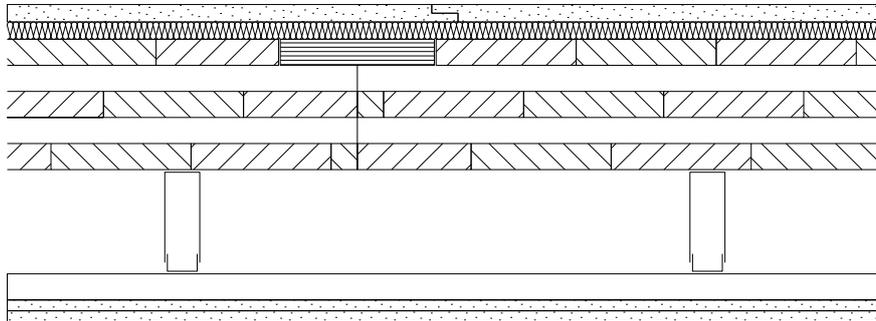
**Tabelle 4.11:** Rohdecke aus Leno162 mit Fließestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Fliessestrich}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 13  | 71.1      | —                      | —                        | —                           |                         |
| 14  | 107.8     | —                      | —                        | —                           |                         |
| 15  | 158.0     | —                      | —                        | —                           |                         |
| 16  | 188.9     | —                      | —                        | —                           |                         |



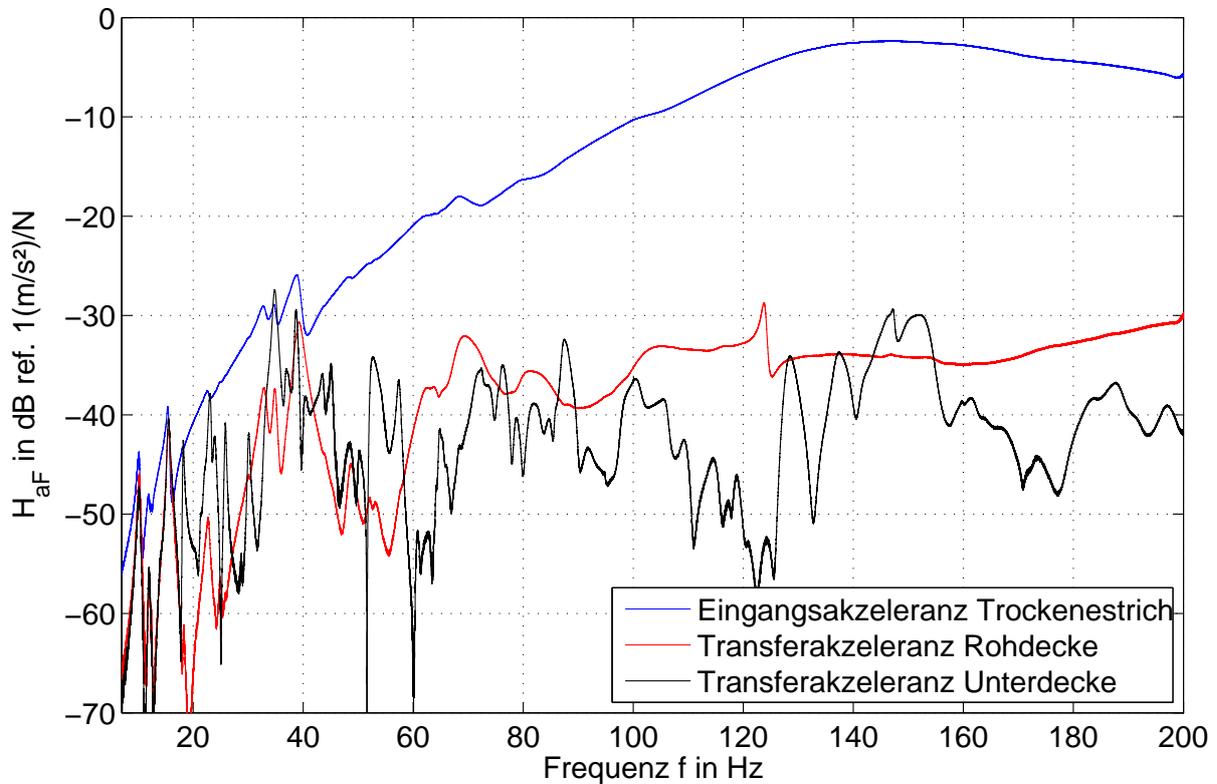
**Abbildung 4.38:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

#### 4.1.5.2 Leno162 mit Trockenestrich und Unterdecke



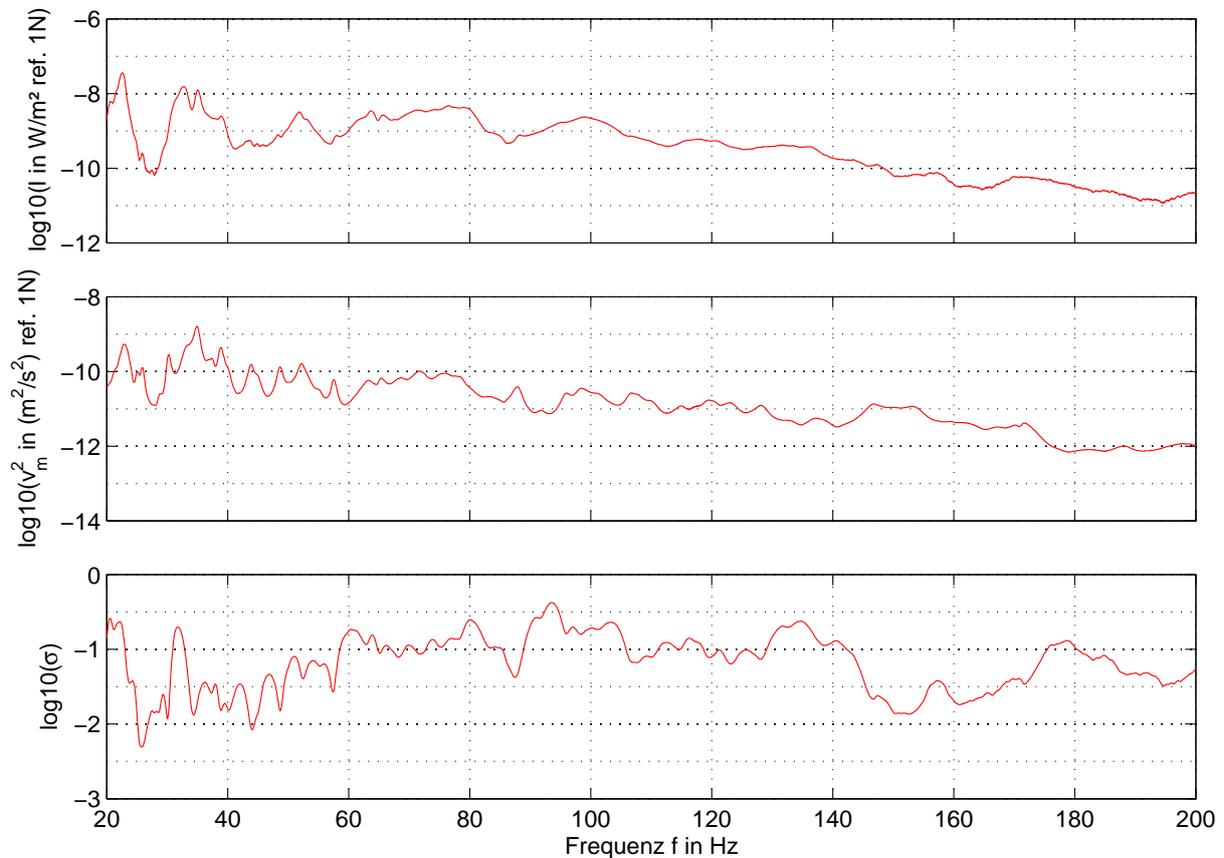
**Abbildung 4.39:** Leno162 Rohdecke mit Trockenestrichaufbau und abgehängter Unterdecke

In Abb. 4.40 ist die Eingangszeleranz des Trockenestrichs sowie die Transferakzeleranz vom Anregungspunkt direkt zu dem darunter liegenden Punkt der Rohdecke und der Unterdecke abgebildet.



**Abbildung 4.40:** Eingangsakzeleranz des Trockenestrichs und Transferakzeleranzen zu Rohdecke und Unterdecke am Punkt der Anregung.

Die Ergebnisse der Messung der abgestrahlten Schallintensität  $I$  und des mittleren Schnellequadrates  $v^2$  auf der Oberfläche sind in Abb. 4.41 zusammengefasst.



**Abbildung 4.41:** Vergleich der abgestrahlten Intensität mit dem mittleren Schnellequadrat auf der Oberfläche der Unterdecke und dem Abstrahlgrad der Unterdecke.

Tabelle 4.12 listet die Resonanzfrequenzen der Leno162-Decke mit Trockenstrich und abgehängter Unterdecke mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.42 entnommen werden.

**Tabelle 4.12:** Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Trockenestr.}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1   | 10.2      | 2.7                    | 2.9                      | 2.8                        |                         |
| 2   | 12        | 1.7                    | 2.2                      | 1.7                        |                         |
| 3   | 15.5      | 2.1                    | 2.2                      | 2.1                        |                         |

**Tabelle 4.12:** Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Trockenestr.}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 4   | 18.2      | 1.2                    | 0.8                      | 0.5                        |                         |
| 5   | 21.2      | —                      | 0.8                      | —                          |                         |
| 6   | 22.6      | —                      | 2.2                      | —                          |                         |

**Tabelle 4.12:** Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Trockenestr.}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 7   | 22.9      | 1.4                    | —                        | 1.7                        |                         |
| 8   | 23.9      | 1.5                    | 1.7                      | 1.5                        |                         |
| 9   | 25.0      | 1.4                    | 0.6                      | 1.6                        |                         |

**Tabelle 4.12:** Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Trockenestr.}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 10  | 25.8      | —                      | 0.8                      | —                          |                         |
| 11  | 28.8      | —                      | 0.7                      | —                          |                         |
| 12  | 30.2      | 0.7                    | 0.9                      | 0.4                        |                         |

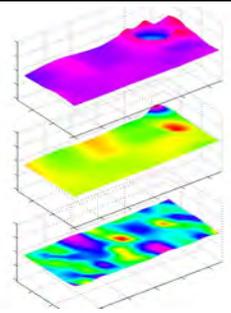
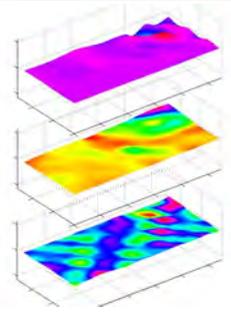
**Tabelle 4.12:** Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

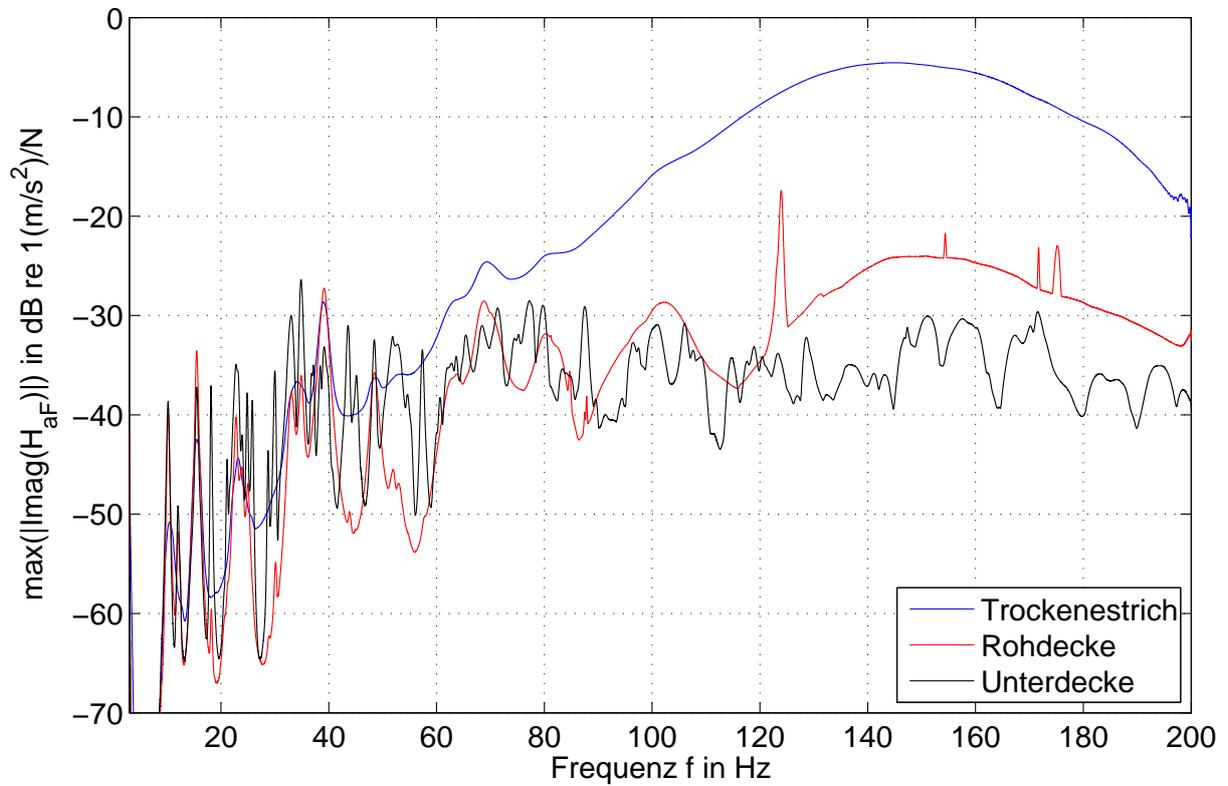
| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Trockenestr.}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 13  | 33.0      | 2.0                    | 1.8                      | 1.9                        |                         |
| 14  | 34.9      | 1.2                    | 1.4                      | 1.2                        |                         |
| 15  | 37.1      | –                      | 0.7                      | –                          |                         |

**Tabelle 4.12:** Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Trockenestr.}$<br>in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 16  | 39.2      | 2.6                    | 0.9                      | 2.5                        |                         |
| 17  | 69.3      | —                      | —                        | -                          |                         |
| 18  | 81.7      | —                      | —                        | -                          |                         |

**Tabelle 4.12:** Rohdecke aus Leno162 mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform (von oben nach unten: Estrich, Rohdecke, Unterdecke)

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$<br>in % | $D_{Unterdecke}$<br>in % | $D_{Trockenestr.}$<br>in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-----------|------------------------|--------------------------|----------------------------|--|
| 19  | 123.8     | —                      | —                        | -                          |   |
| 20  | 151.8     | —                      | —                        | -                          |  |

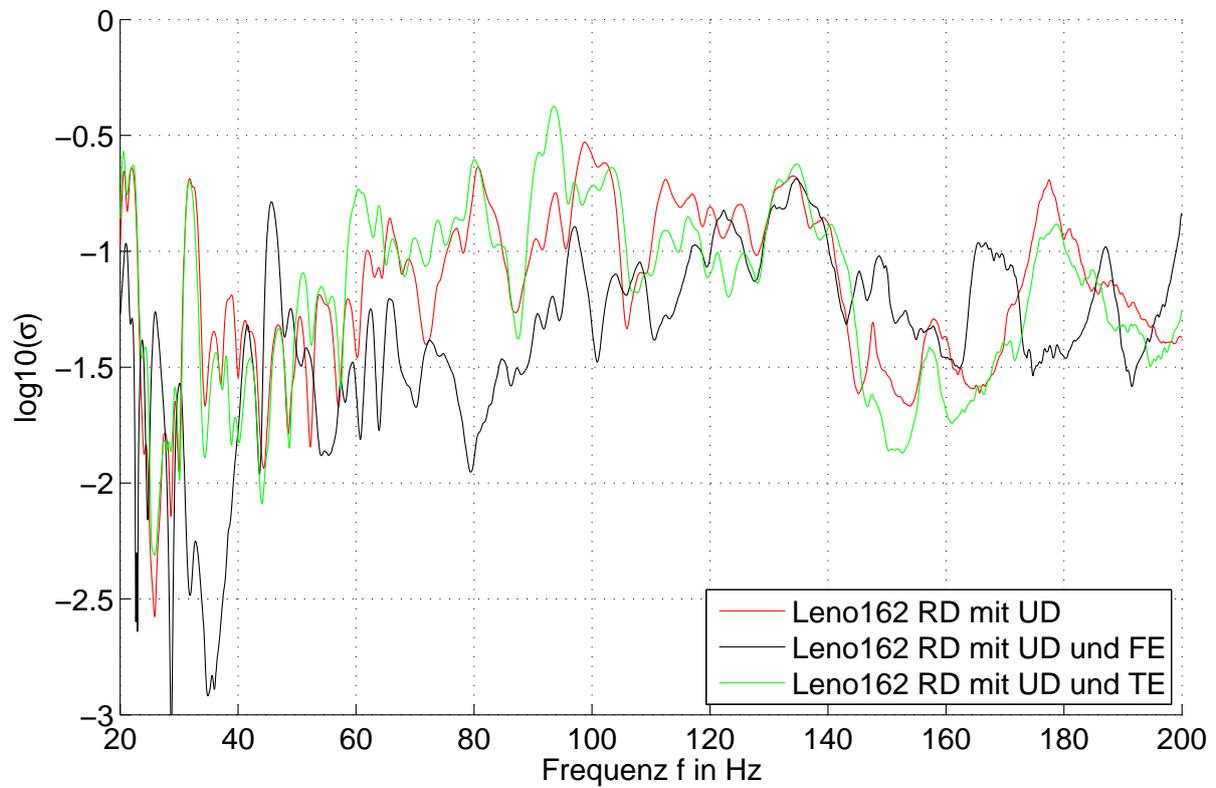


**Abbildung 4.42:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

#### 4.1.6 Vergleich der Abstrahlgrade der Unterdecke bei unterschiedlichen Aufbauten

In Abb. 4.43 sind die Abstrahlmaße der Unterdecke unter der Leno162 Deckenkonstruktion bei drei unterschiedlichen Ausbauten verglichen, und zwar ohne zusätzliche Aufbauten (Rohdecke), mit Trockenestrichaufbau und mit Fließestrichaufbau.

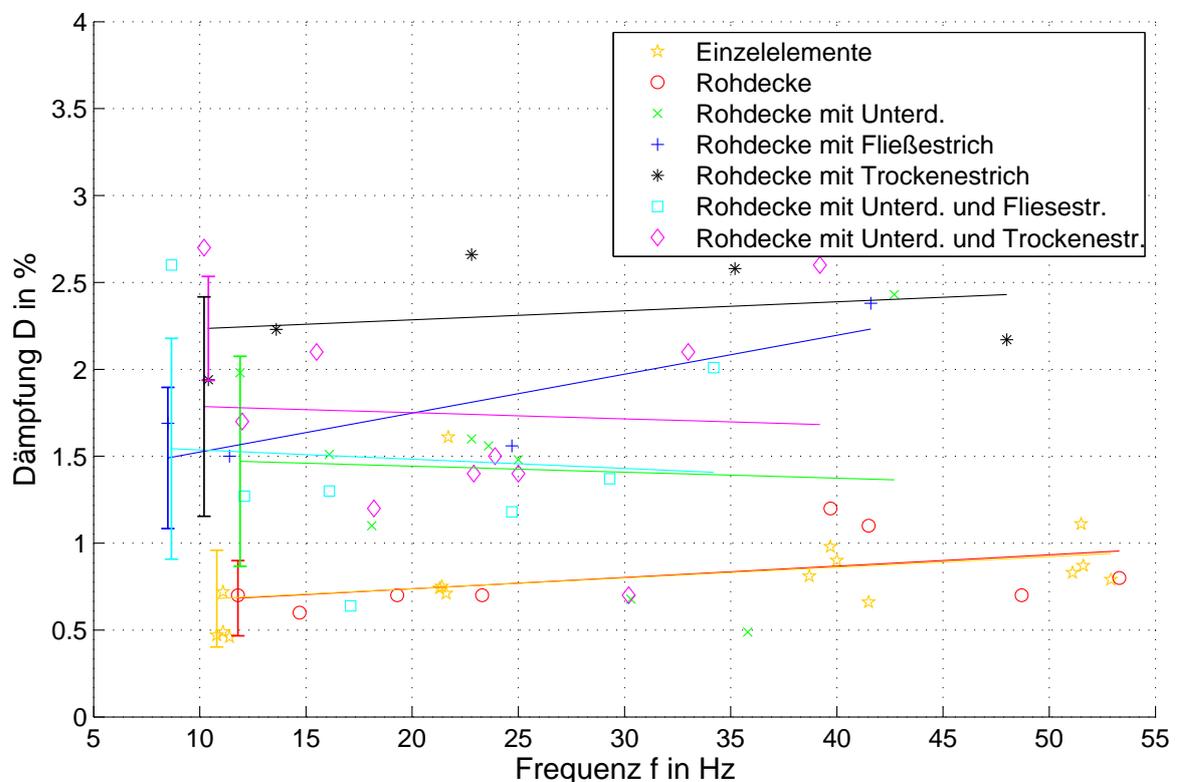
Im Fall der direkten Anregung der Rohdecke und der Anregung über den Trockenestrich sind die Abstrahlmaße im gesamten Frequenzbereich sehr ähnlich. Bei der Anregung des Systems über den Fließestrich ergibt sich jedoch bei ca.  $35 \text{ Hz}$  und bei ca.  $80 \text{ Hz}$  ein deutlicher Unterschied. Dies kann seine Ursache in der unterschiedlichen Biegesteifigkeit der Estrichsysteme haben. Bei der Anregung der Rohdecke über den Trockenestrich erfolgt diese wie im Fall der direkten Anregung eher lokal. Im Fall der Anregung über den steiferen Fließestrich erfolgt die Anregung der Rohdecke eher flächig. Eine topologisch unterschiedliche Anregung der Rohdecke führt zu einer unterschiedlichen Anregung der Eigenschwingformen der Rohdecke (veränderte modale Lasten) und damit zu einer veränderten Schwingform der erzwungenen Schwingungen der Unterdecke. Eine Ursache für die beobachteten Differenzen der Abstrahlmaße kann in der Tatsache begründet sein, dass die einzelnen Eigenschwingformen der Rohdecke stark unterschiedliche Abstrahlmaße aufweisen.



**Abbildung 4.43:** Vergleich der Abstrahlmaße der UD unter der Leno162 Rohdecke, und zwar ohne weiteren Deckenaufbau (Rohdecke), mit Trockenestrich und mit Fließestrich.

### 4.1.7 Übersicht Dämpfungen der Leno162 Deckenkonstruktionen

In Abb. 4.44 sind die Dämpfungen der einzelnen Deckenaufbauten über der Frequenz aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Verbindung der Einzelelemente zu einer Rohdecke keine zusätzliche Dämpfung der Struktur bewirkt. Der Einbau einer Schwingungsschutzmaßnahme in Form eines schwimmenden Estrichs oder einer Unterdecke bewirkt eine zusätzliche Dämpfung der Struktur von ca. 0.5% – 1%. Der Einbau eines zweiten Schwingungsschutzsystems bringt keine zusätzliche Dämpfung.



**Abbildung 4.44:** Vergleich der Dämpfung der Rohdecke aus Leno162 mit unterschiedlichen Ausbauten, alle zweiseitig aufgelagert. Aufgetragen sind punktwise die Werte für die Dämpfung über den Resonanzfrequenzen mit den dazugehörigen Ausgleichsgeraden. Die senkrechten Balken zu Beginn der Ausgleichsgeraden markieren den Bereich der Standardabweichung. Aufgrund der hohen Modendichte der Konstruktionen mit Estrichen und Unterdecken ist die Modendichte im Frequenzbereich über ca. 50 Hz zu hoch um Auswertungen der Dämpfungen durchzuführen.

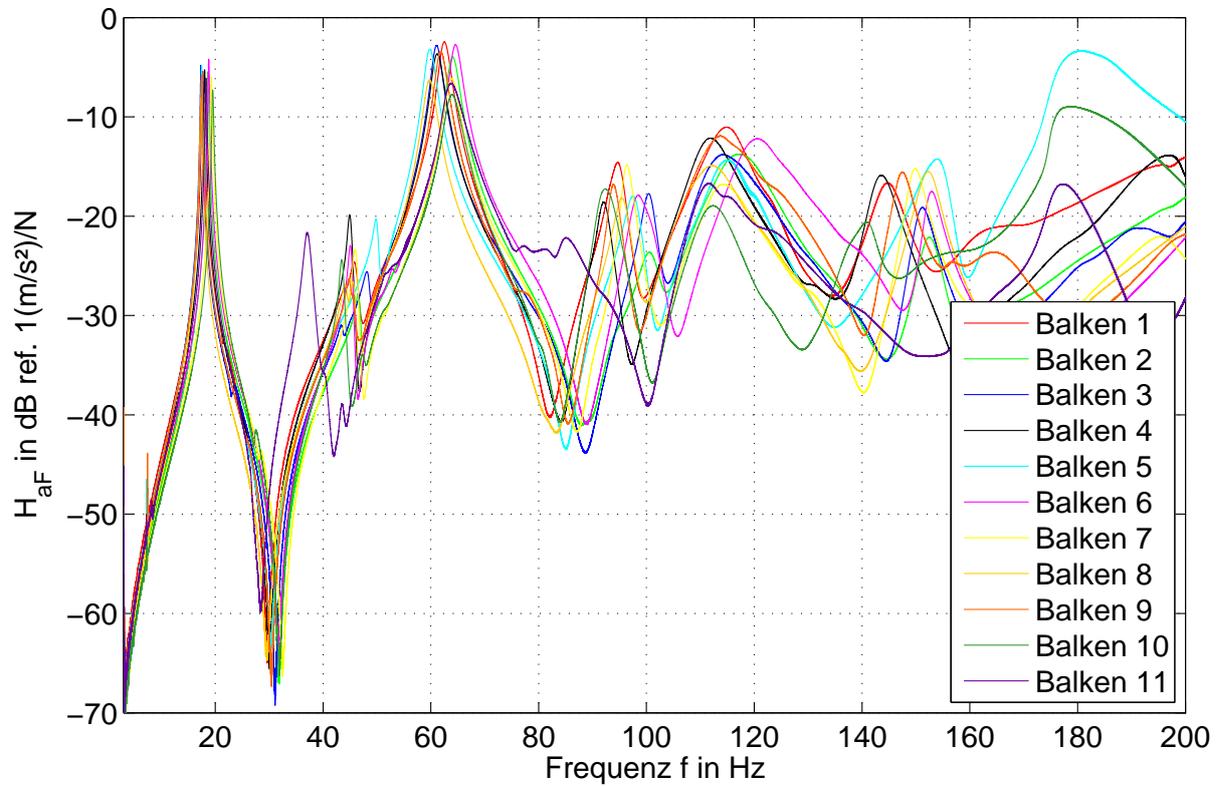


## 4.2 Messungen an Holzbalkendecke

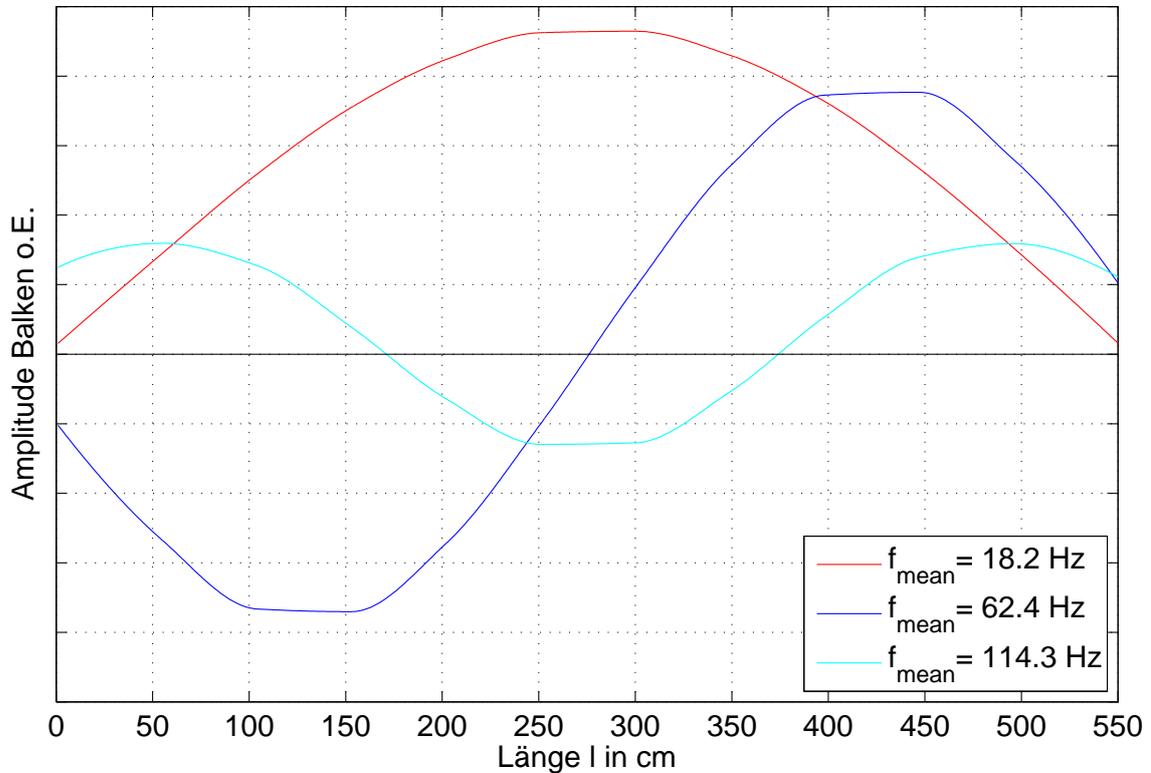
Bei der Holzbalkendeckenkonstruktion werden zunächst einige der einzelnen Balken messtechnisch untersucht. Im Folgenden wird die Rohdecke einzeln, in Kombination mit einer abgehängten Unterdecke und zum Abschluss mit einem schwimmenden Trockenestrich mit und ohne Splitschüttung untersucht.

### 4.2.1 Einzelbalken

Vor dem Zusammenbau der Holzbalkendecke werden 11 der insgesamt 24 einzelnen Balken hinsichtlich ihrer Eigenresonanzen und Betriebsschwingungsformen untersucht. Dabei werden die Balken auf den Elastomerstreifen des Auflagers gestellt und ohne zusätzliche Befestigung bzw. Einspannung vermessen. In Abb. 4.45 sind die Eingangsakzeleranzen der einzelnen Holzbalken dargestellt.



**Abbildung 4.45:** Eingangszakzeleranz von 11 Einzelbalken mit  $l = 5.5 \text{ m}$ ,  $b = 6 \text{ cm}$  und  $h = 24 \text{ cm}$ . Die Auswertung der Betriebsschwingungsformen (s. Abb. 4.46) zeigt, dass die ersten drei Eigenformen der Balken den Maxima bei ca.  $18 \text{ Hz}$ ,  $60 \text{ Hz}$ , und  $114 \text{ Hz}$  entsprechen.



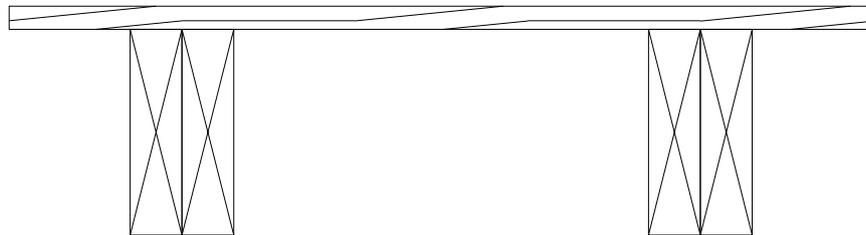
**Abbildung 4.46:** Betriebsschwingungsformen der 11 Einzelbalken bei ihren ersten drei Resonanzfrequenzen. An den Auflagern liegen die Balken jeweils nur lose auf. Dadurch ergeben sich auch direkt am Auflager noch Verschiebungen in vertikaler Richtung.

In Tabelle 4.13 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Resonanzfrequenzen und Dämpfungen der einzelnen Holzbalken angegeben.

**Tabelle 4.13:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Resonanzfrequenzen und der Dämpfungen (berechnet aus Halbwertsbreite) der Einzelbalken.

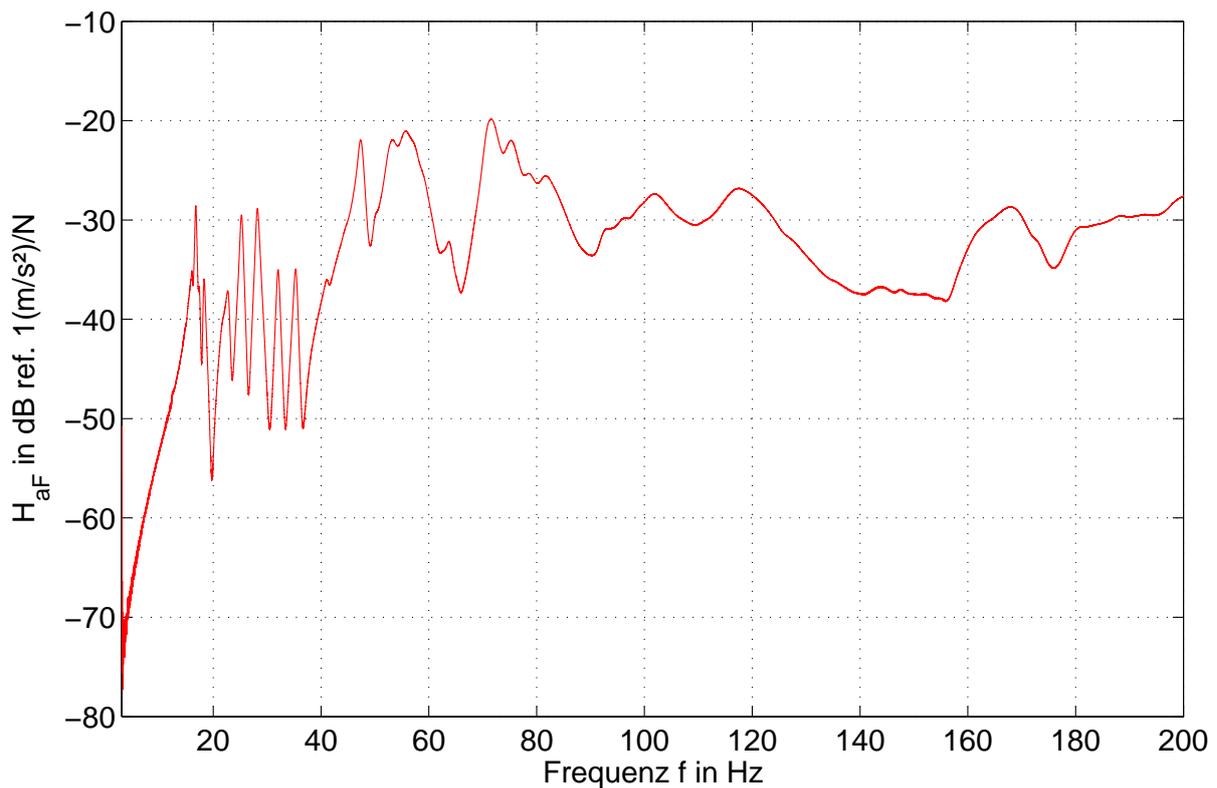
|                         | $f_1$ | $f_2$ | $f_3$ |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| $f_{\text{mean}}$ in Hz | 18.2  | 62.4  | 114.3 |
| $\sigma_f$ in Hz        | 0.8   | 1.8   | 2.7   |
| $D_{\text{mean}}$ in %  | 0.5   | 1.3   | 2.1   |
| $\sigma_D$ in %         | 0.0   | 0.3   | 0.6   |

## 4.2.2 Rohdecke



**Abbildung 4.47:** Holzbalkendecke als Rohdecke. Spannweite:  $l = 5.50 \text{ m}$ , Breite  $b = 5.50 \text{ m}$ .

In Abb. 4.48 ist die Eingangsakzeleranz der Holzbalken-Rohdecke dargestellt.

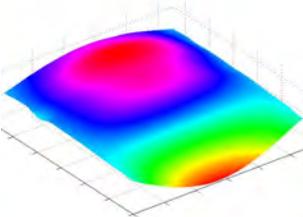
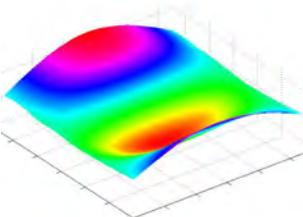
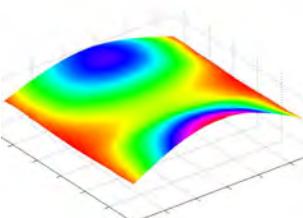


**Abbildung 4.48:** Eingangsakzeleranz der Holzbalkendecke als Rohdecke, zweiseitig aufgelagert.

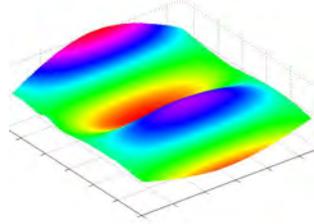
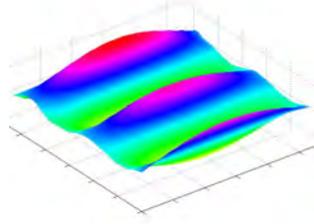
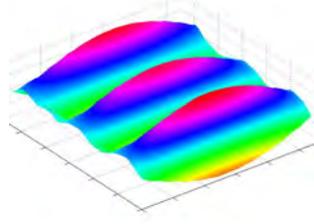
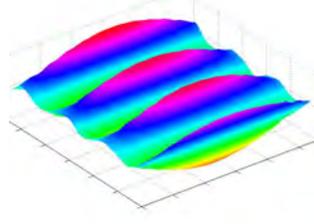
Tabelle 4.14 listet die Resonanzfrequenzen der Holzbalkendecke ohne zusätzliche Aufbauten

mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.49 entnommen werden.

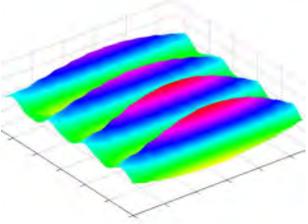
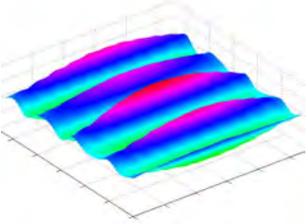
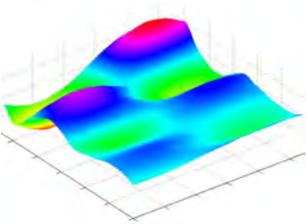
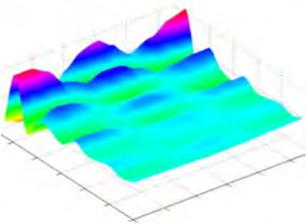
**Tabelle 4.14:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke als Rohdecke, zweiseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

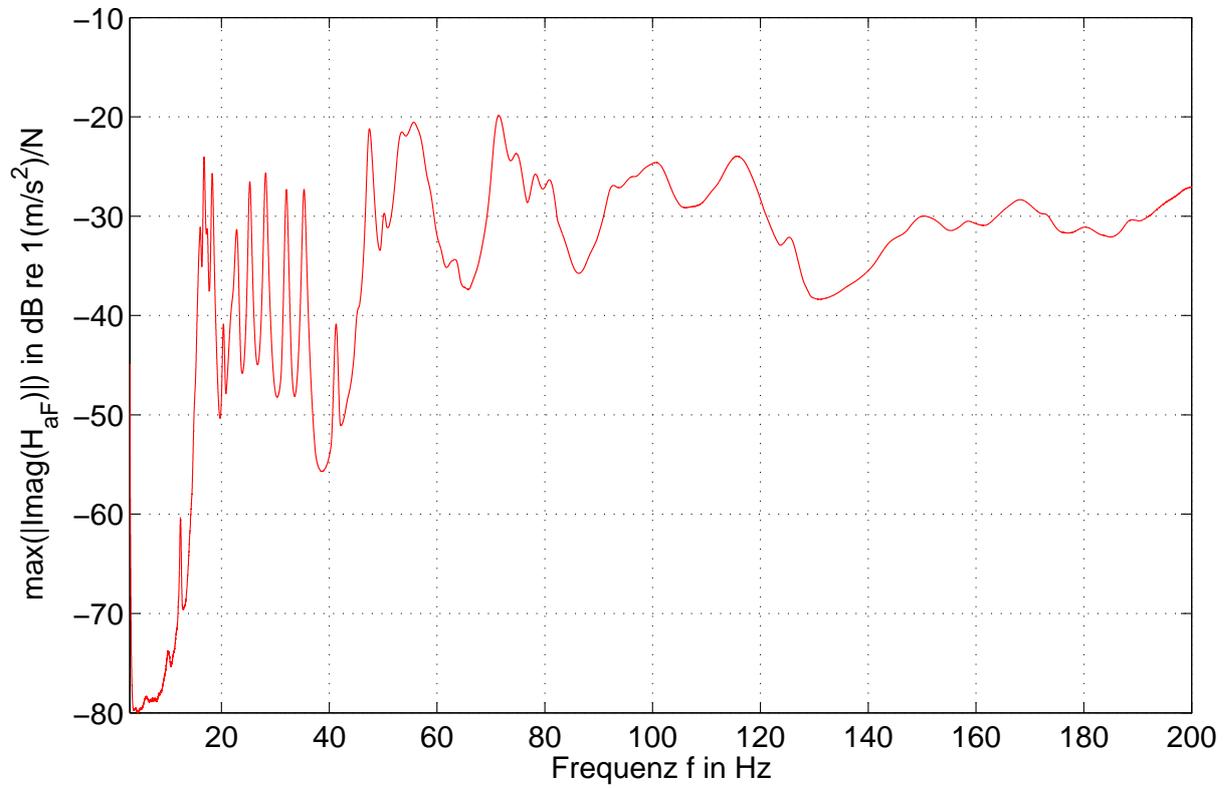
| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Resonanzfrequenzen   |
|-----|-----------|----------|--|
| 1   | 16.1      | 1.5      |    |
| 2   | 16.8      | 1.2      |   |
| 3   | 17.4      | 1.3      |  |

**Tabelle 4.14:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke als Rohdecke, zweiseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 4   | 18.3      | 1.3      |    |
| 5   | 22.9      | 2.1      |   |
| 6   | 25.3      | 1.3      |  |
| 7   | 28.2      | 1.3      |  |

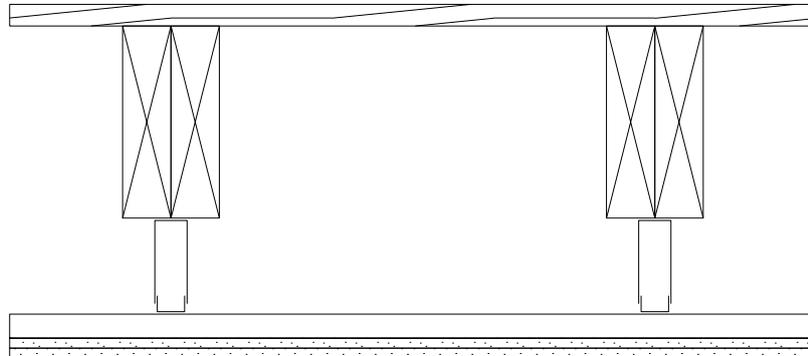
**Tabelle 4.14:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke als Rohdecke, zweiseitig aufgelagert mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-----------|----------|--|
| 8   | 32.1      | 1.1      |    |
| 9   | 35.3      | 1.1      |   |
| 10  | 55.9      | —        |  |
| 11  | 117.2     | —        |  |



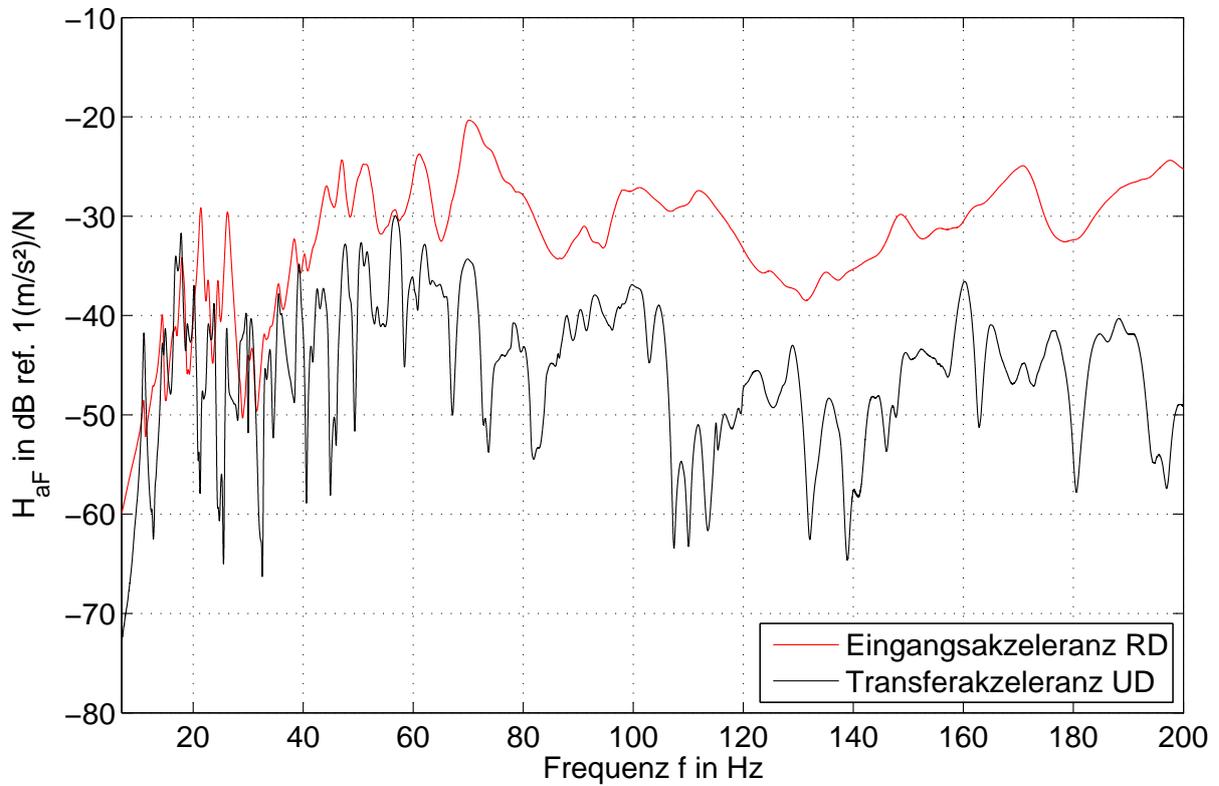
**Abbildung 4.49:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

### 4.2.3 Rohdecke mit Unterdecke



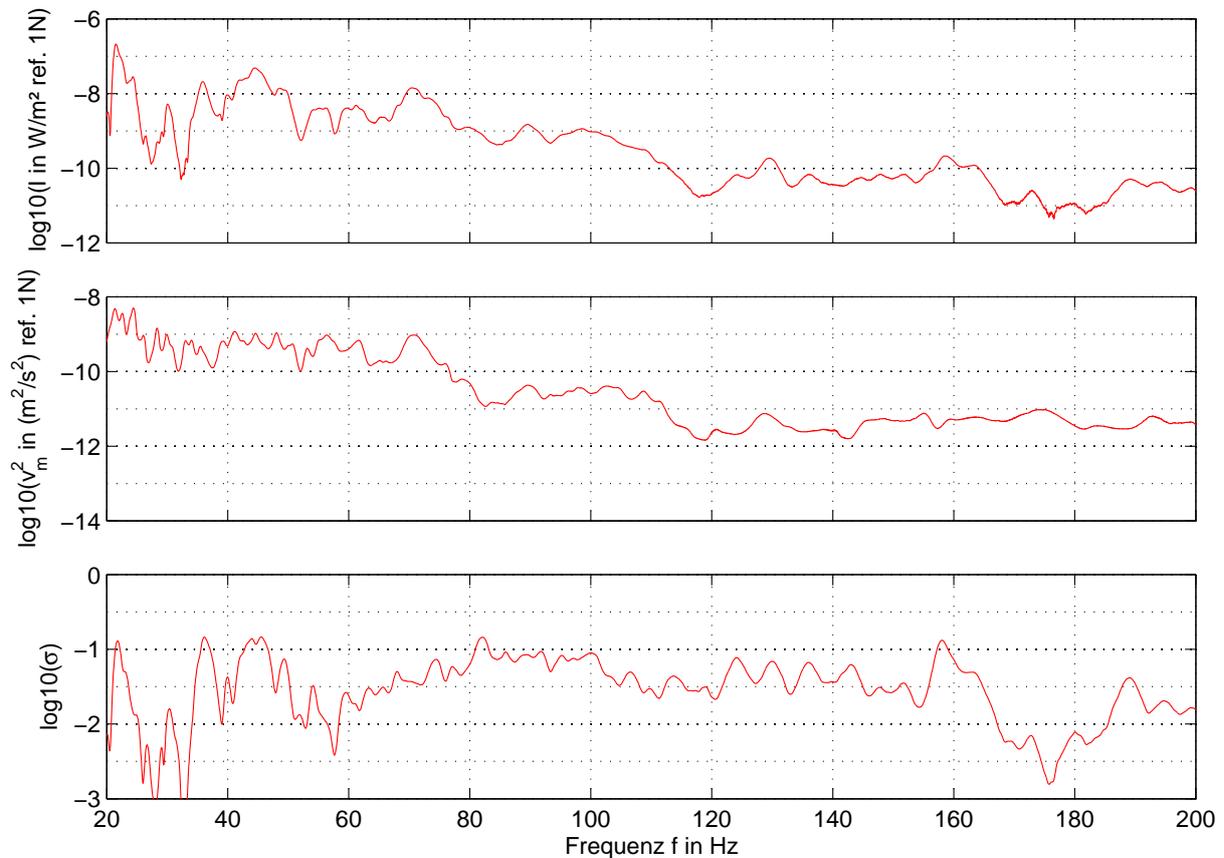
**Abbildung 4.50:** Schnitt Holzbalkendecke mit Unterdecke. Spannweite:  $l = 5.50 \text{ m}$ , Breite  $b = 5.50 \text{ m}$ .

In Abb. 4.51 ist die Eingangsakzeleranz der Rohdecke sowie die Transferakzeleranz vom Anregungspunkt direkt zu dem darunter liegenden Punkt der Unterdecke abgebildet.



**Abbildung 4.51:** Eingangszkzeleranz der Holzbalkendecke mit Unterdecke und Transferakzeleranz zu Unterdecke.

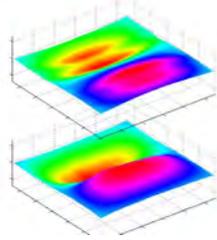
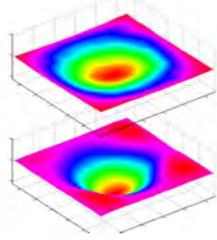
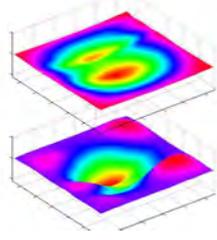
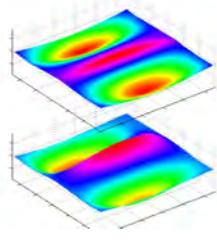
Die Ergebnisse der Messung der abgestrahlten Schallintensität  $I$  und des mittleren Schnellequadrates  $v^2$  auf der Oberfläche sind in Abb. 4.52 zusammengefasst.



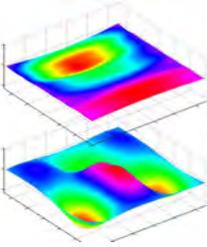
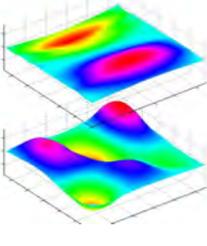
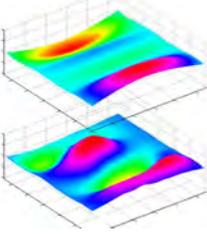
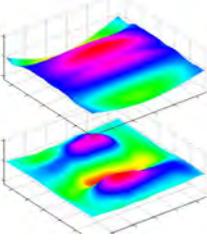
**Abbildung 4.52:** Vergleich der abgestrahlten Intensität mit dem mittleren Schnellequadrat auf der Oberfläche der Unterdecke und dem Abstrahlgrad der Unterdecke.

Tabelle 4.15 listet die Resonanzfrequenzen der Holzbalkendecke mit Unterdecke mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.53 entnommen werden.

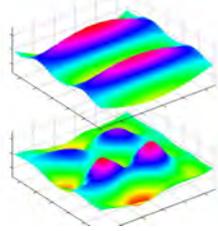
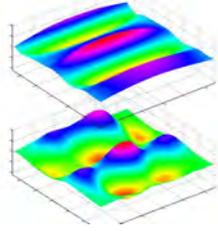
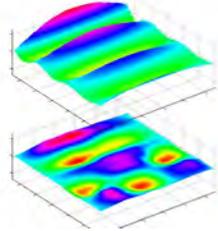
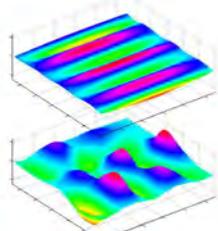
**Tabelle 4.15:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke mit Unterdecke mit Dämpfung (ME'SCOPE®) der Rohdecke und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|---------------------|---|
| 1   | 11.1        | 1.5                 |    |
| 2   | 12.9        | 0.9                 |   |
| 3   | 13.2        | 2.7                 |  |
| 4   | 14.5        | 1.8                 |  |

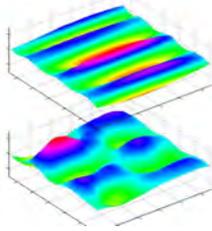
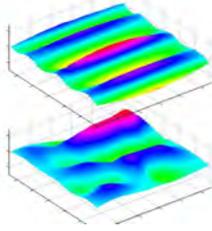
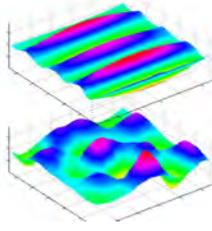
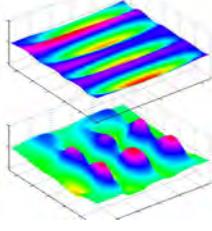
**Tabelle 4.15:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke mit Unterdecke mit Dämpfung (ME'SCOPE® ) der Rohdecke und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|---------------------|---|
| 5   | 16.3        | 1.9                 |    |
| 6   | 16.9        | 1.1                 |   |
| 7   | 18.3        | 1.3                 |  |
| 8   | 21.5        | 1.7                 |  |

**Tabelle 4.15:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke mit Unterdecke mit Dämpfung (ME'SCOPE®) der Rohdecke und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|---------------------|---|
| 9   | 22.7      | 1.5                 |    |
| 10  | 24.6      | 1.1                 |   |
| 11  | 26.2      | 1.6                 |  |
| 12  | 28.6      | 0.5                 |  |

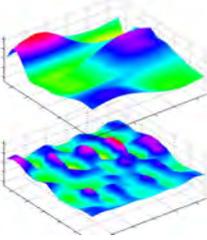
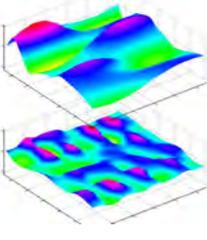
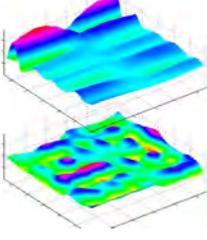
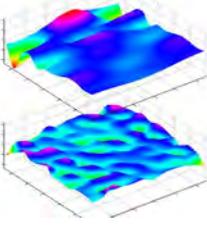
**Tabelle 4.15:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke mit Unterdecke mit Dämpfung (ME'SCOPE® ) der Rohdecke und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|---------------------|---|
| 13  | 29.9        | 1.2                 |    |
| 14  | 30.8        | 1.5                 |   |
| 15  | 33.0        | 1.4                 |  |
| 16  | 34.2        | 1.0                 |  |

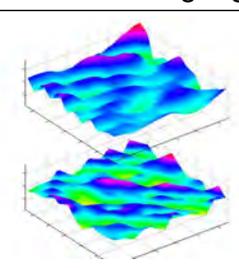
**Tabelle 4.15:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke mit Unterdecke mit Dämpfung (ME'SCOPE®) der Rohdecke und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

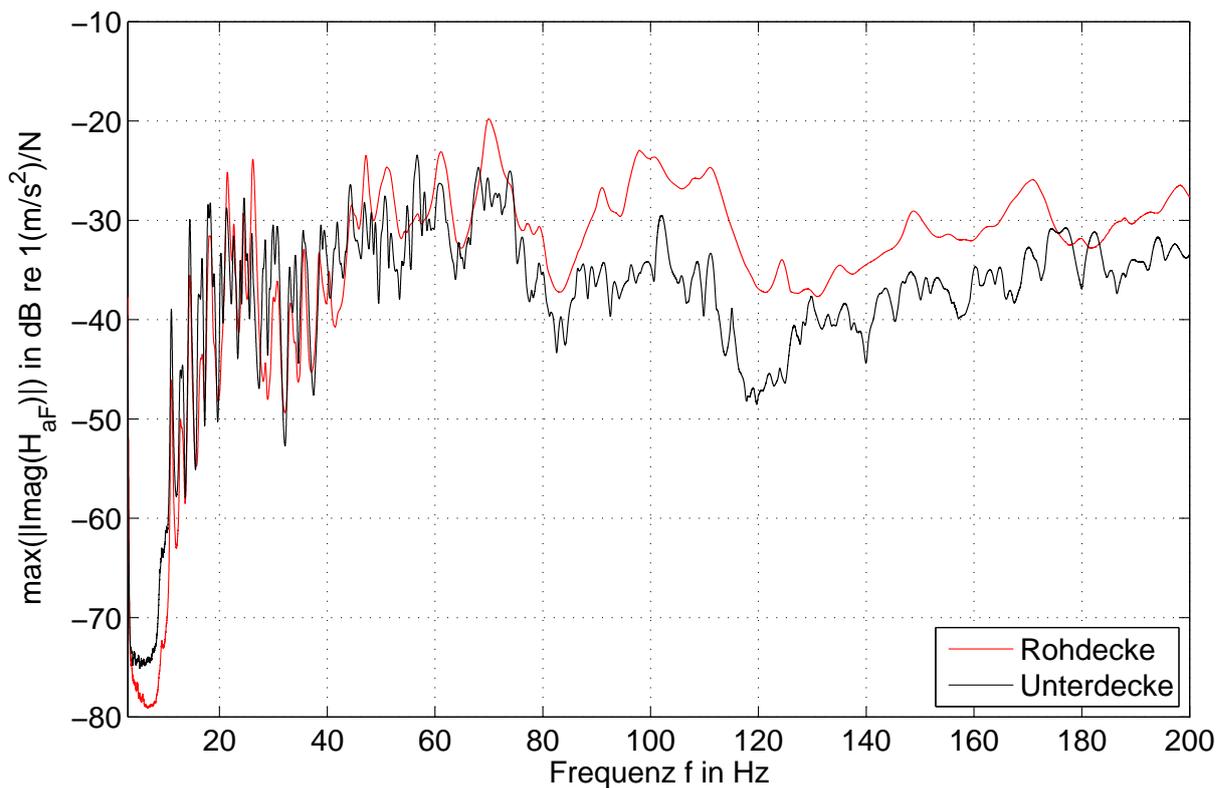
| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|---------------------|-------------------------|
| 17  | 35.7      | 1.3                 |                         |
| 18  | 38.5      | 1.2                 |                         |
| 19  | 40.3      | 1.3                 |                         |
| 20  | 44.2      | 2.1                 |                         |

**Tabelle 4.15:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke mit Unterdecke mit Dämpfung (ME'SCOPE®) der Rohdecke und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|---------------------|---|
| 21  | 50.0      | 1.4                 |    |
| 22  | 51.7      | 1.8                 |   |
| 23  | 70.5      | 1.6                 |  |
| 24  | 91.2      | —                   |  |

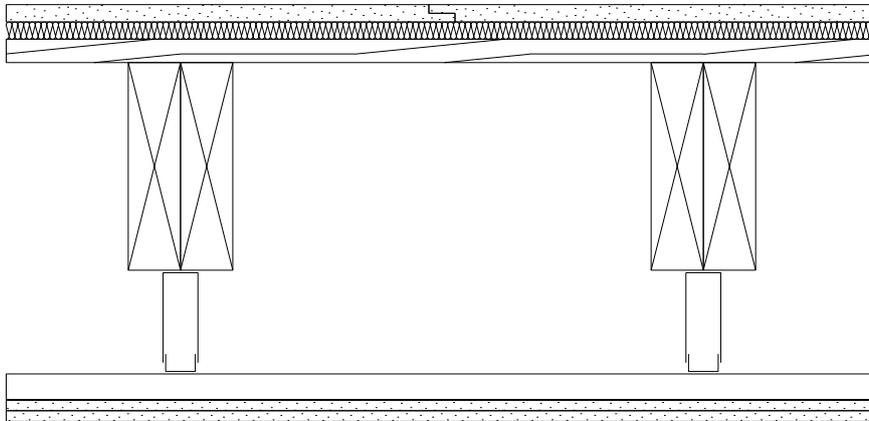
**Tabelle 4.15:** Resonanzfrequenzen Holzbalkendecke mit Unterdecke mit Dämpfung (ME'SCOPE®) der Rohdecke und Betriebsschwingungsform (oben Rohdecke, unten Unterdecke). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|---------------------|---|
| 25  | 148.6     | —                   |  |



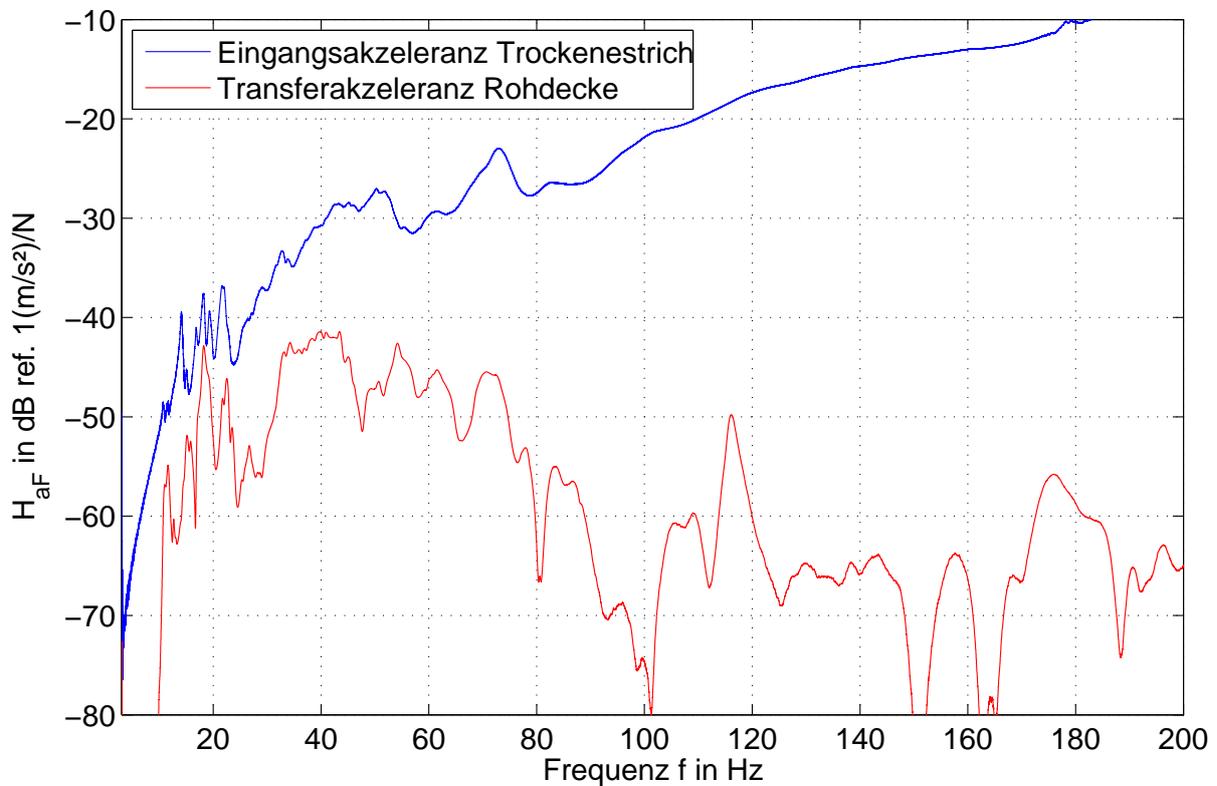
**Abbildung 4.53:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

## 4.2.4 Rohdecke mit Trockenestrich und Unterdecke



**Abbildung 4.54:** Holzbalkendecke mit Trockenestrichaufbau und abgehängter Unterdecke.  $l = 5.5 \text{ m}$ ,  
 $b = 5.5 \text{ m}$

In Abb. 4.55 ist die Eingangszeleranz des Trockenestrichs sowie die Transferakzeleranz vom Anregungspunkt direkt zu dem darunter liegenden Punkt der Rohdecke abgebildet. Eine Messung der Unterdecke liegt hier nicht vor.



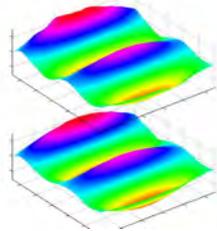
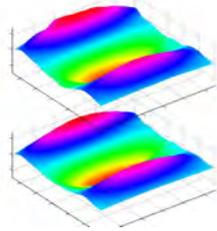
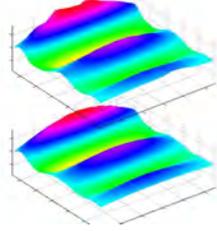
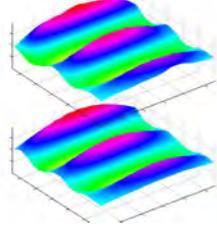
**Abbildung 4.55:** Holzbalkendecke mit abgehängter Unterdecke und Trockenestrich. Eingangsakzeleranz des Trockenestrich und Transferakzeleranz der Rohdecke am Punkt der Anregung.

Tabelle 4.16 listet die Resonanzfrequenzen der Holzbalkendecke mit Unterdecke und Trockenestrich mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.56 entnommen werden.

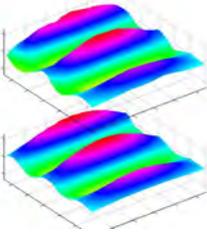
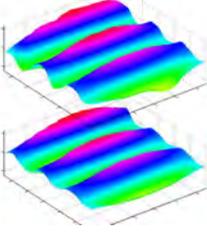
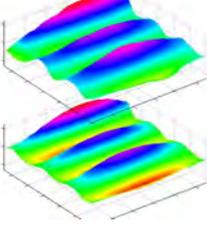
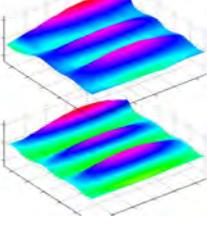
**Tabelle 4.16:** Rohdecke aus Holzbalkendecke mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® der Rohdecke und Betriebsschwingungsform von Trockenestrich (oben) und Rohdecke (unten). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|---------------------|-------------------------|
| 1   | 10.8      | 1.8                 |                         |
| 2   | 11.6      | 2.0                 |                         |
| 3   | 14.2      | 1.8                 |                         |
| 4   | 15.2      | 1.8                 |                         |

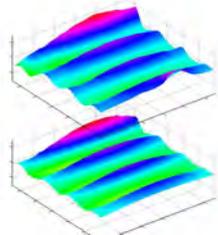
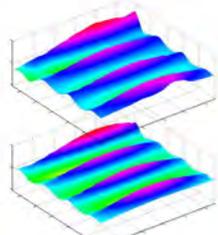
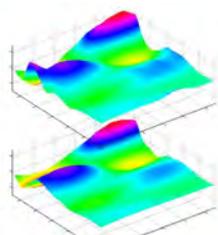
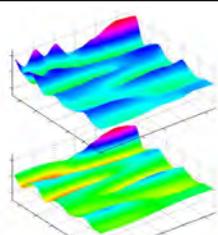
**Tabelle 4.16:** Rohdecke aus Holzbalkendecke mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE<sup>®</sup> der Rohdecke und Betriebsschwingungsform von Trockenestrich (oben) und Rohdecke (unten). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|---------------------|---|
| 5   | 18.4      | 1.9                 |    |
| 6   | 19.4      | 2.5                 |   |
| 7   | 22.0      | 2.3                 |  |
| 8   | 23.0      | 1.2                 |  |

**Tabelle 4.16:** Rohdecke aus Holzbalkendecke mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® der Rohdecke und Betriebsschwingungsform von Trockenestrich (oben) und Rohdecke (unten). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

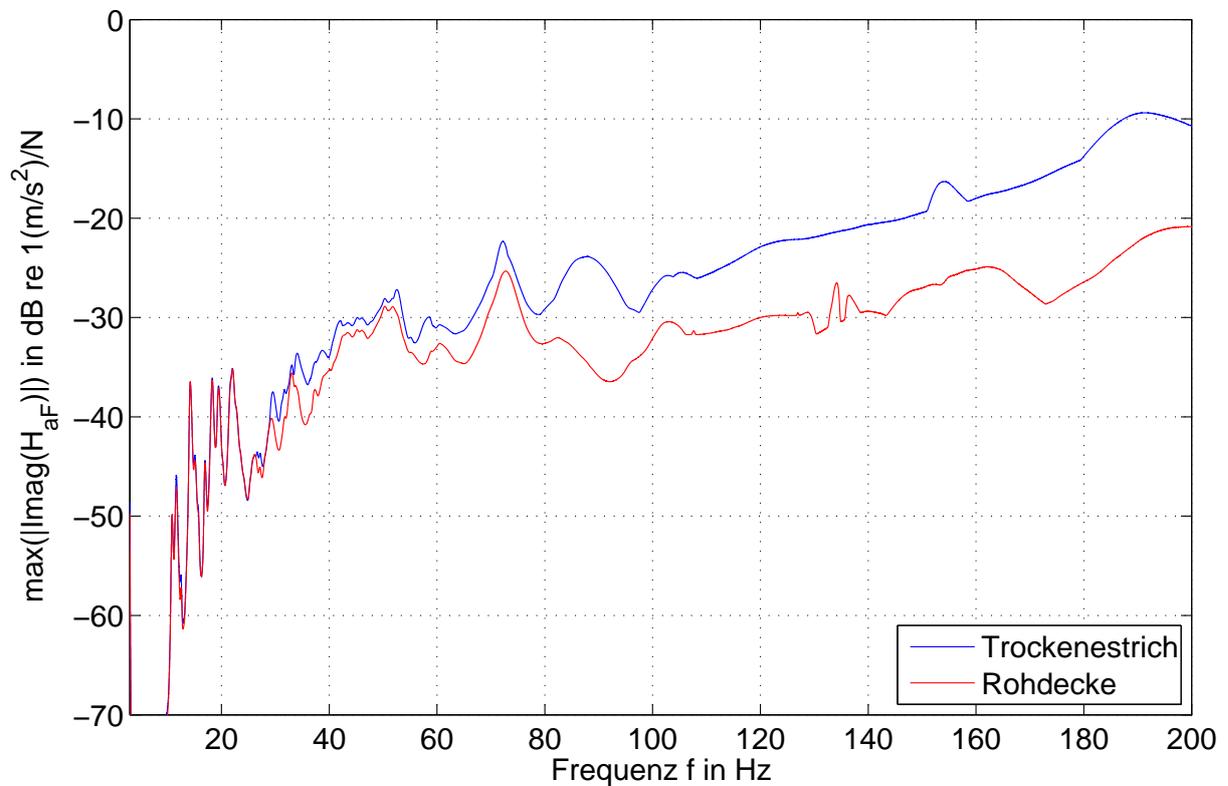
| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|---------------------|---|
| 9   | 23.6      | 1.8                 |    |
| 10  | 25.7      | 3.0                 |   |
| 11  | 28.1      | 3.1                 |  |
| 12  | 29.8      | 2.7                 |  |

**Tabelle 4.16:** Rohdecke aus Holzbalkendecke mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME<sup>3</sup>SCOPE<sup>®</sup> der Rohdecke und Betriebsschwingungsform von Trockenestrich (oben) und Rohdecke (unten). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|---------------------|---|
| 13  | 32.5      | 1.5                 |    |
| 14  | 33.9      | 3.7                 |   |
| 15  | 44.3      | —                   |  |
| 16  | 54.1      | —                   |  |

**Tabelle 4.16:** Rohdecke aus Holzbalkendecke mit Trockenestrich und Unterdecke. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® der Rohdecke und Betriebsschwingungsform von Trockenestrich (oben) und Rohdecke (unten). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

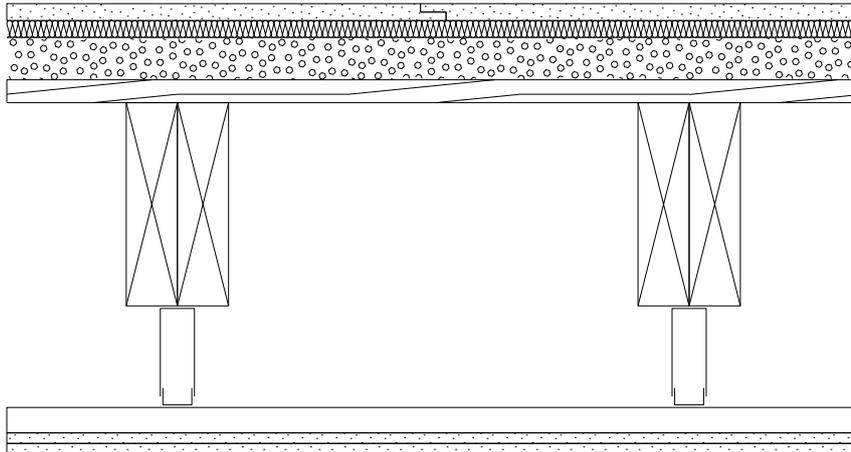
| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|---------------------|-------------------------|
| 17  | 70.7      | —                   |                         |
| 18  | 116.0     | —                   |                         |
| 19  | 157.6     | —                   |                         |
| 20  | 176.4     | —                   |                         |



**Abbildung 4.56:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen. Ab ca. 50 Hz werden die Maxima des Trockenstrichs vor allem durch lokal begrenzte Schwingungsamplituden im Bereich der Anregung bestimmt. Dies ist deutlich in den Betriebsschwingungsformen in Tabelle 4.16 erkennbar.

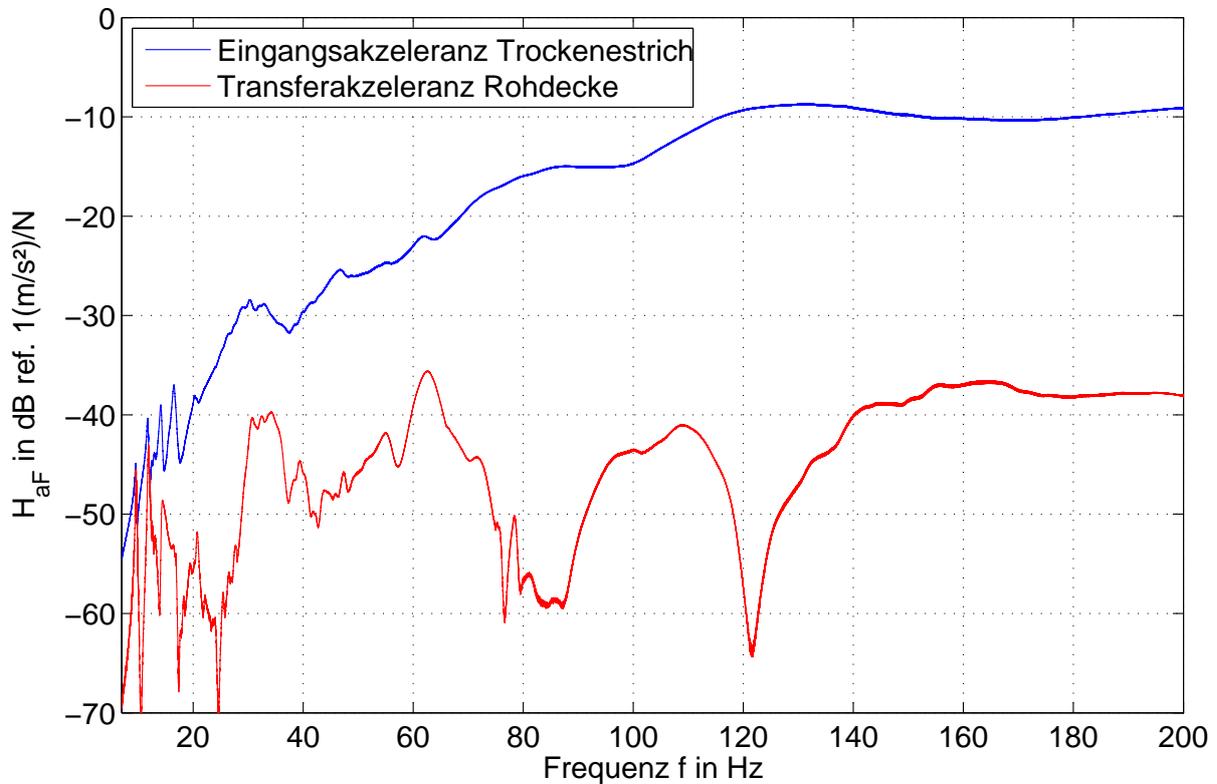
## 4.2.5 Rohdecke mit Trockenestrich, Unterdecke und Schüttung

Zwischen der Rohdecke und dem Trockenestrich wird eine Splitschüttung in Waben in einer Dicke von  $d = 30 \text{ mm}$  mit einer flächenbezogenen Masse von  $m' = 45 \text{ kg} / \text{m}^2$  aufgebracht und die Messungen an der Rohdecke und auf dem Estrich wiederholt. Eine weitere Messung an der Unterdecke wird hier nicht durchgeführt.



**Abbildung 4.57:** Holzbalkendecke mit Trockenestrichaufbau, abgehängter Unterdecke und 30 mm Schüttung zwischen Trockenestrich und Rohdecke.  $l = 5.5 \text{ m}$ ,  $b = 5.5 \text{ m}$

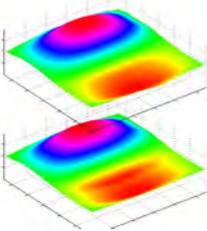
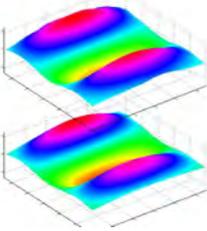
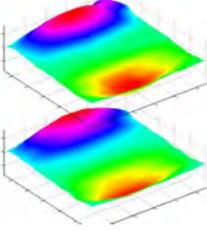
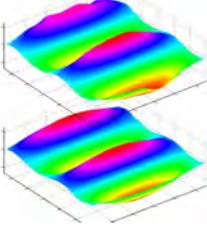
In Abb. 4.58 ist die Eingangsakzeleranz des Trockenestrichs sowie die Transferakzeleranz vom Anregungspunkt direkt zu dem darunter liegenden Punkt der Rohdecke abgebildet. Eine Messung der Unterdecke liegt hier nicht vor.



**Abbildung 4.58:** Holzbalkendecke mit abgehängter Unterdecke, Trockenestrich und Schüttung. Eingangsakzeleranz des Trockenestrich und Transferakzeleranz der Rohdecke am Punkt der Anregung.

Tabelle 4.17 listet die Resonanzfrequenzen der Holzbalkendecke mit Unterdecke und Trockenestrich mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.59 entnommen werden.

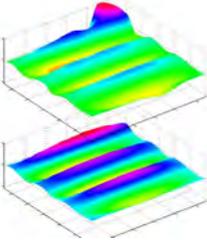
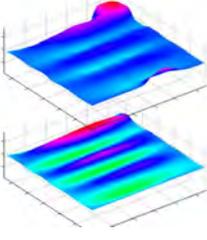
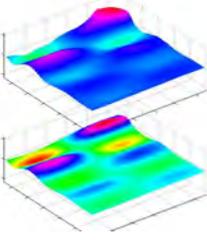
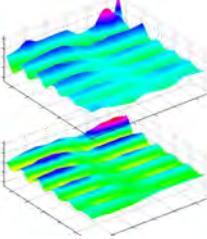
**Tabelle 4.17:** Rohdecke aus Holzbalkendecke mit Trockenestrich, Unterdecke und Schüttung. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME<sup>3</sup>SCOPE<sup>®</sup> der Rohdecke und Betriebschwingungsform von Trockenestrich (oben) und Rohdecke(unten). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|---------------------|---|
| 1   | 9.6       | 1.3                 |    |
| 2   | 11.9      | 1.7                 |   |
| 3   | 12.8      | 1.6                 |  |
| 4   | 14.2      | 2.1                 |  |

**Tabelle 4.17:** Rohdecke aus Holzbalkendecke mit Trockenestrich, Unterdecke und Schüttung. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® der Rohdecke und Betriebsschwingungsform von Trockenestrich (oben) und Rohdecke (unten). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

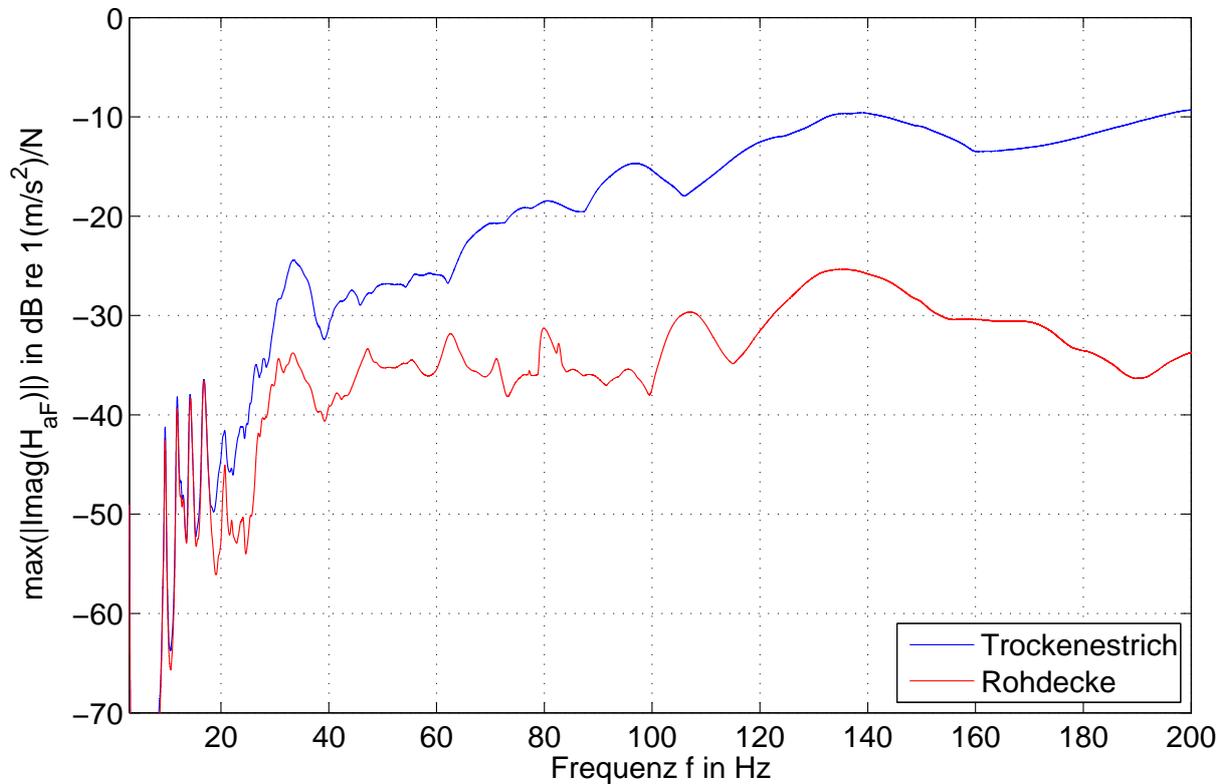
| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|---------------------|-------------------------|
| 5   | 16.8      | 2.5                 |                         |
| 6   | 19.2      | 1.9                 |                         |
| 7   | 20.4      | 1.3                 |                         |
| 8   | 20.7      | 1.8                 |                         |

**Tabelle 4.17:** Rohdecke aus Holzbalkendecke mit Trockenestrich, Unterdecke und Schüttung. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME'SCOPE® der Rohdecke und Betriebsschwingungsform von Trockenestrich (oben) und Rohdecke (unten). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|---------------------|---|
| 9   | 22.1      | 1.1                 |    |
| 10  | 24.1      | 1.0                 |   |
| 11  | 34.5      | —                   |  |
| 12  | 62.2      | —                   |  |

**Tabelle 4.17:** Rohdecke aus Holzbalkendecke mit Trockenestrich, Unterdecke und Schüttung. Resonanzfrequenzen mit modalen Dämpfungswerten aus ME<sup>3</sup>SCOPE<sup>®</sup> der Rohdecke und Betriebsschwingungsform von Trockenestrich (oben) und Rohdecke (unten). Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

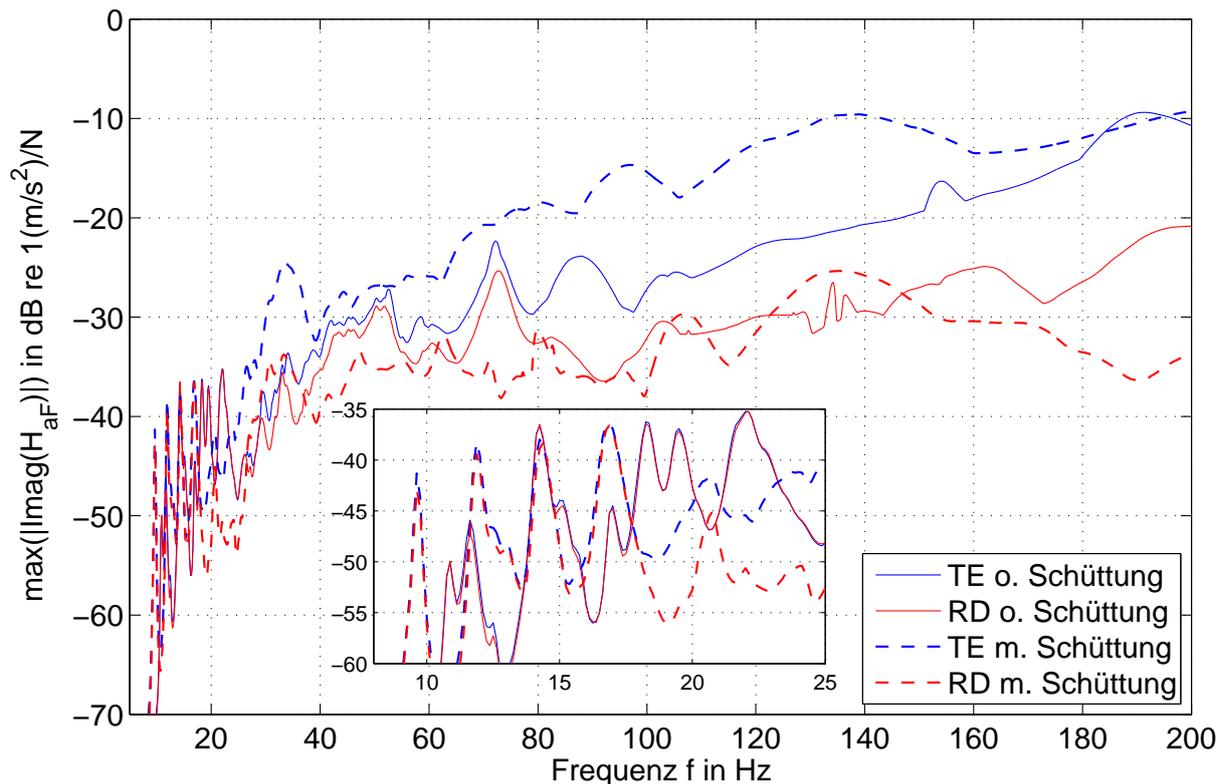
| Nr. | $f$ in Hz | $D_{Rohdecke}$ in % | Betriebsschwingungsform |
|-----|-----------|---------------------|-------------------------|
| 13  | 78.5      | —                   |                         |
| 14  | 109.0     | —                   |                         |
| 15  | 143.8     | —                   |                         |
| 16  | 166.8     | —                   |                         |



**Abbildung 4.59:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen. Ab ca. 50 Hz werden die Maxima des Trockenestrichs vor allem durch lokal begrenzte Schwingungsamplituden im Bereich der Anregung bestimmt. Dies ist deutlich in den Betriebsschwingungsformen in Tabelle 4.17 erkennbar.

## 4.2.6 Vergleich der Holzbalkendecke mit unterschiedlichen Aufbauten

Abbildung 4.60 zeigt einen Vergleich der Maxima der Betriebsschwingformen mit und ohne Schüttung.

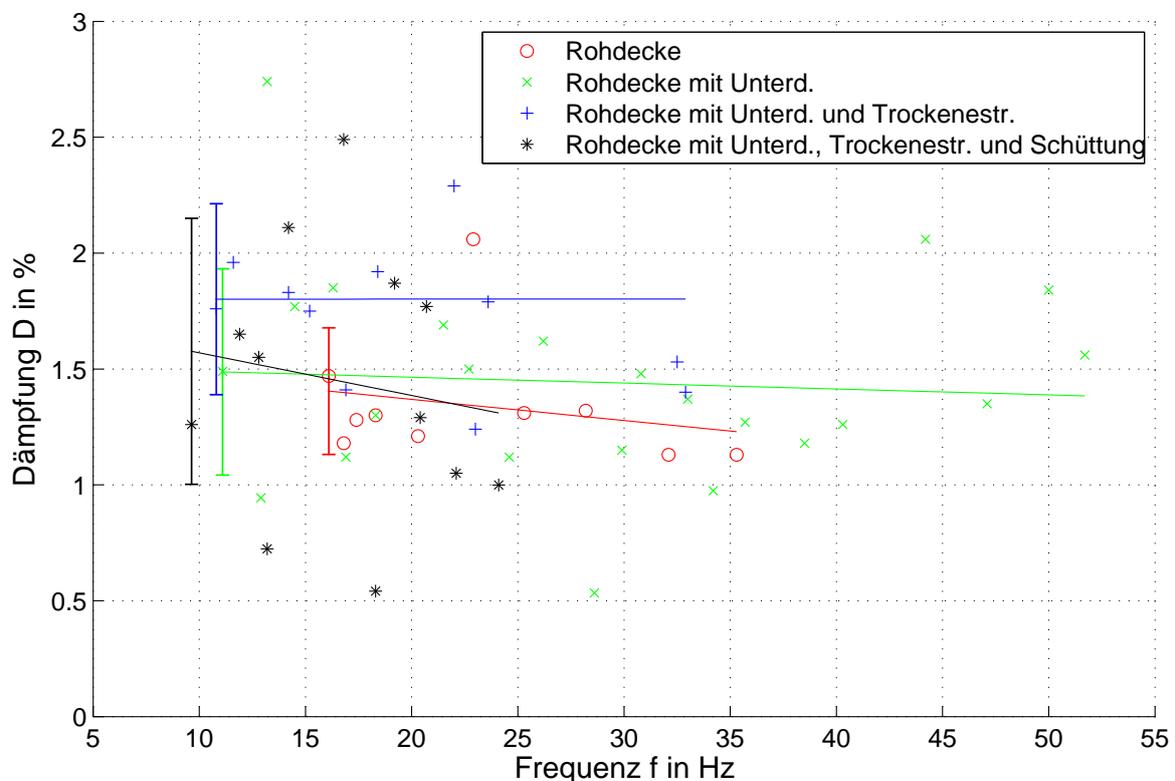


**Abbildung 4.60:** Vergleich der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen des Trockenestrich und der Rohdecke mit und ohne Schüttung. Der restliche Deckenaufbau ist unverändert und gleich.

Im eingefügten Bildausschnitt ist zu erkennen, dass im Frequenzbereich bis ca.  $25\text{ Hz}$  die Akzeleranz des Trockenestrich der Akzeleranz der Rohdecke ohne Schüttung folgt, die beiden Akzeleranzen bei der Decke mit Schüttung jedoch bereits ab ca.  $18\text{ Hz}$  auseinander laufen. Der Unterschied der Resonanzfrequenzen zwischen den beiden Decken mit und ohne Schüttung kann durch ein Ersatzmodell eines einfachen Masse-Feder-Masse-Systems allein durch die Massenerhöhung der Schüttung abgeschätzt werden.

Im Bereich über ca.  $40\text{ Hz}$  wirkt sich die Schüttung insgesamt dämpfend auf das Hauptsystem

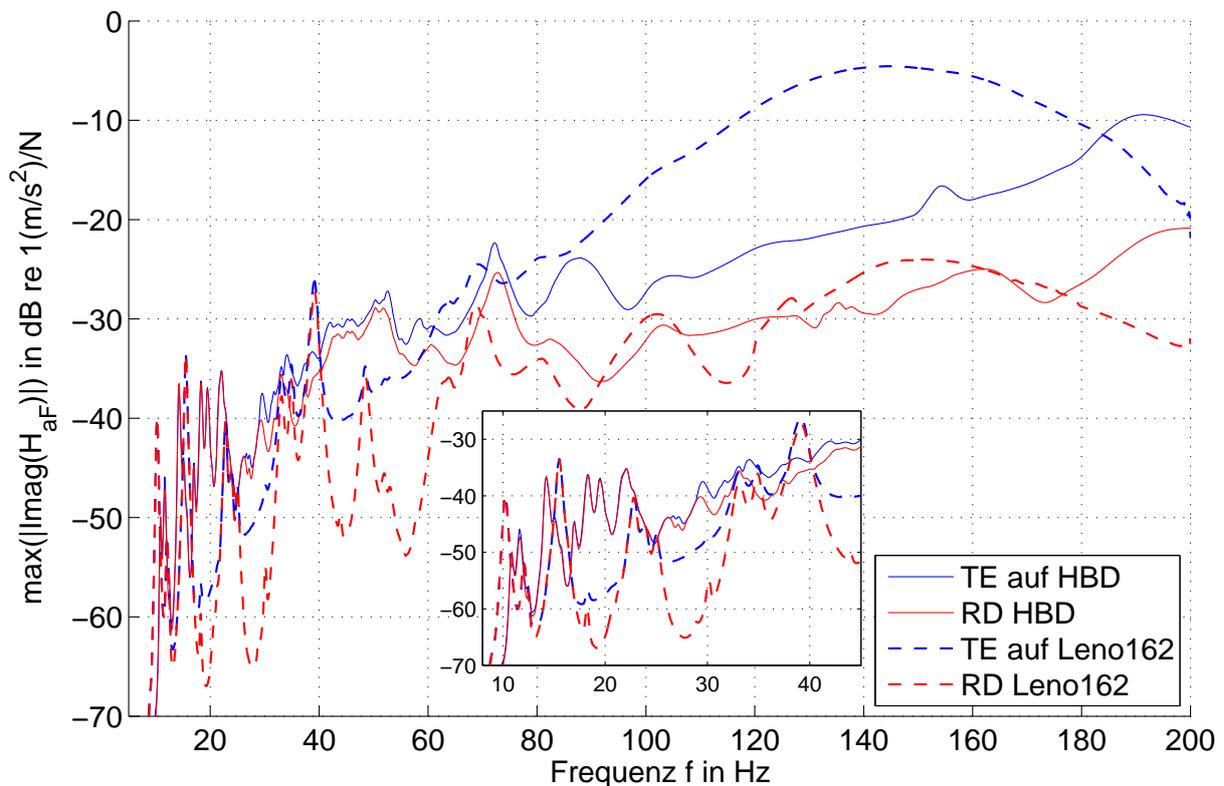
Rohdecke aus, die Schwingungsmaxima sind deutlich schwächer ausgeprägt. Die Akzeleranz des Trockenstriches ist bei der beschwerten Rohdecke bis ca. 180 Hz deutlich erhöht, der Trockenstrich ist leichter anregbar. Dies lässt sich durch ein Ersatzmodell aus einem Zweimasenschwinger erklären, jedoch nicht in dem beobachteten Maße von ca. 10 dB. Grund ist, dass in diesem Frequenzbereich der Trockenstrichs auf Grund seiner geringen Biegesteifigkeit stark lokal reagiert (s. Tabelle 4.17). Abb. 4.61 zeigt die Dämpfungen der Holzbalkendecke mit und ohne Schwingungsschutzsysteme. Abbildung 4.61 zeigt eine Darstellung der Dämpfungswerte der unterschiedlichen Aufbauten im Frequenzbereich bis 55 Hz.



**Abbildung 4.61:** Vergleich der Dämpfungswerte der Holzbalkendecke mit verschiedenen Anbauten (Unterdecke, Trockenstrich, Schüttung). Aufgetragen sind punktwiese die Werte für die Dämpfung über den Resonanzfrequenzen mit den dazugehörigen Ausgleichsgeraden. Die senkrechten Balken zu Beginn der Ausgleichsgeraden markieren den Bereich der Standardabweichung.

## 4.2.7 Vergleich von Holzbalkendecke und Brettsperrholzdecke mit Trockenestrich

Abbildung 4.62 zeigt einen Vergleich der Maxima der Betriebsschwingformen des Trockenestrichs und Rohdecke der Deckenaufbauten von Leno162 mit Unterdecke und Trockenestrich und der Holzbalkendecke mit Unterdecke und Trockenestrich.



**Abbildung 4.62:** Vergleich der Maxima der Amplituden der Betriebsschwingformen des Trockenestrichs und einer Rohdecke aus Leno162 bzw. als Holzbalkendecke. Beide Konstruktionen sind jeweils mit Unterdecke ausgeführt. Der Bereich von  $8\text{ Hz}$  bis  $45\text{ Hz}$  ist in dem kleinen Diagramm nochmals genauer dargestellt.

Trotz der höheren flächenbezogenen Masse der Leno162 Konstruktion mit Unterdecke von ca.  $m' = 98 \text{ kg/m}^2$  verglichen zu  $m' = 64 \text{ kg/m}^2$  im Fall der Holzbalkendecke mit Unterdecke liegt die Akzeleranz im Frequenzbereich ab ca.  $60 \text{ Hz}$  bei beiden Rohdecken in einem ähnlichen Bereich. Die Akzeleranz des Trockenestrich ist bei der schwereren Rohdeckenkonstruktion aus



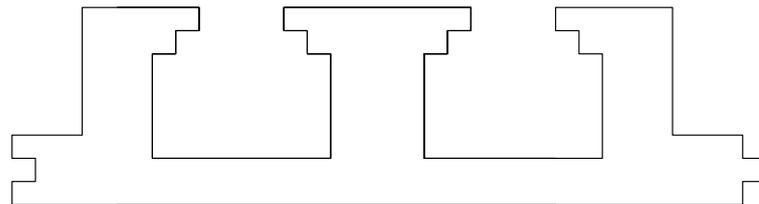
Leno162 jedoch deutlich höher. Dies ist ähnlich zu beobachten beim Trockenestrich auf der Holzbalkendecke mit Schüttung (s. Kap. 4.2.6).

## 4.3 Messungen an Hohlkastenträgerdecke

Zunächst werden auch hier die einzelnen Elemente vermessen. Die Rohdecke hat bereits eine fertige Untersicht, weshalb keine zusätzliche Unterdecke eingebaut wird. Die Schallabstrahlung wird direkt unter der Rohdecke gemessen. Es werden zusätzlich Untersuchungen zur Auswirkung einer schweren Schüttung in den Hohlräumen der Elemente durchgeführt.

### 4.3.1 Einzelemente

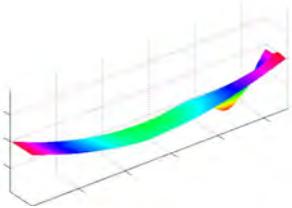
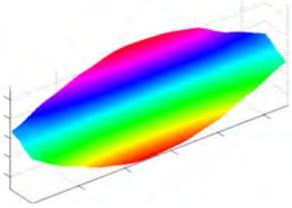
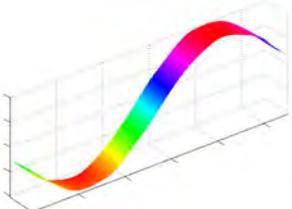
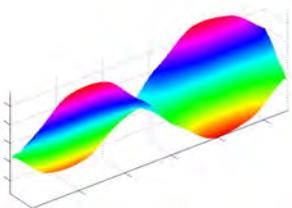
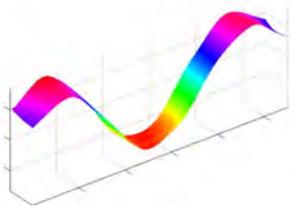
Vor dem Aufbau der Rohdecke werden die einzelnen Elemente hinsichtlich ihrer Resonanzfrequenzen, Dämpfungen und Betriebsschwingungsformen untersucht. Da eine Positionierung des Schwingerregers über jedem Element nicht möglich ist, wird die Messung als Hammermessung durchgeführt.



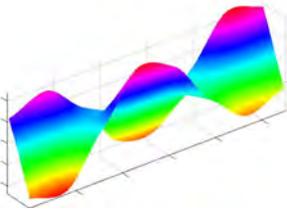
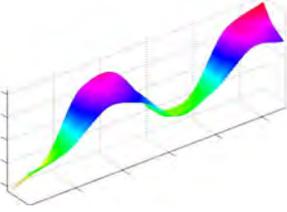
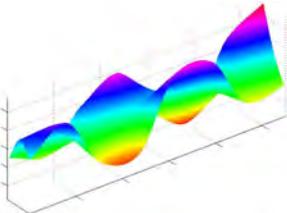
**Abbildung 4.63:** Einzelnes Element der Hohlkastenträgerdecke im Schnitt.

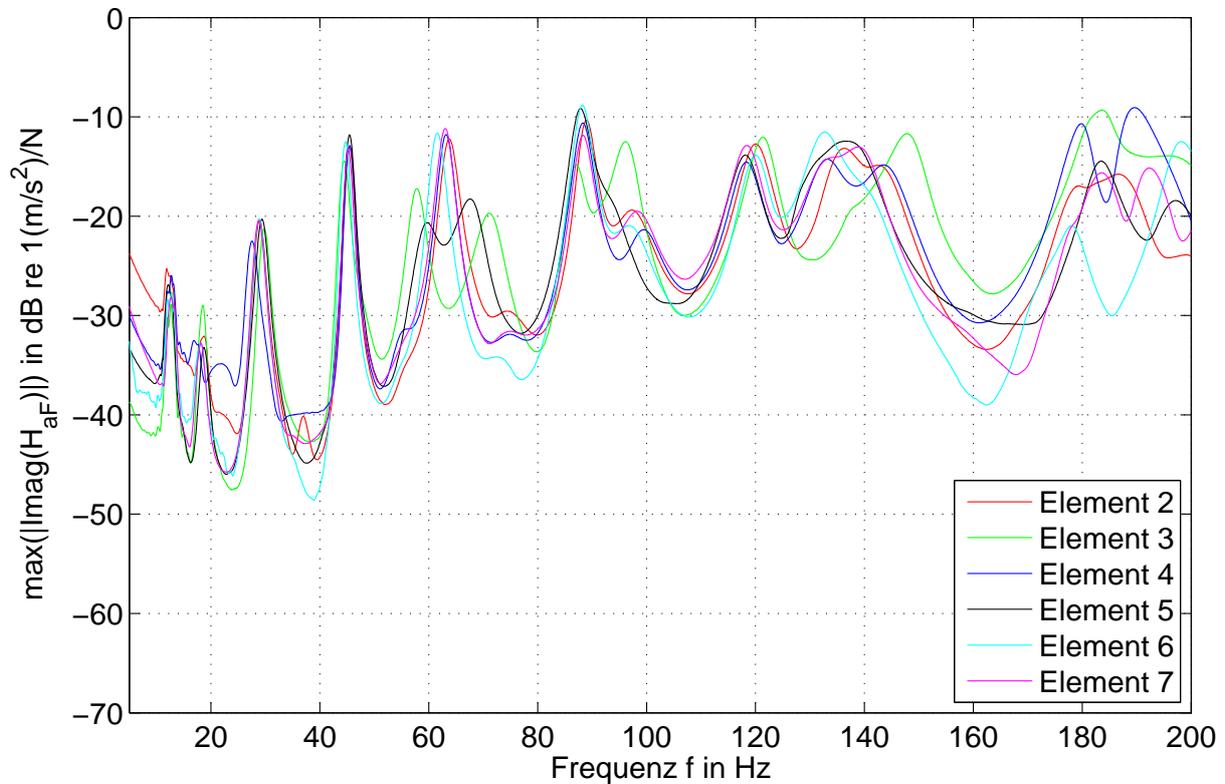
Tabelle 4.18 listet die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Resonanzfrequenzen und Dämpfungen der einzelnen Hohlkastenträgerelemente auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.64 entnommen werden.

**Tabelle 4.18:** Hohlkastenträger, sieben einzelne Elemente, Mittelwerte und Standardabweichungen der Resonanzfrequenzen und Dämpfungen (berechnet aus Halbwertsbreite), Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f_{mittel}$<br>in Hz | $\sigma_f$ in<br>Hz | $D_{mittel}$<br>in % | $\sigma_D$ in<br>% | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--|
| 1   | 12.2                  | 0.8                 | —                    | —                  |    |
| 2   | 29.0                  | 0.7                 | —                    | —                  |    |
| 3   | 45.1                  | 0.4                 | 1.9                  | 0.1                |  |
| 4   | 61.9                  | 2.3                 | 2.1                  | 0.2                |  |
| 5   | 88.1                  | 0.6                 | 1.7                  | 0.1                |  |

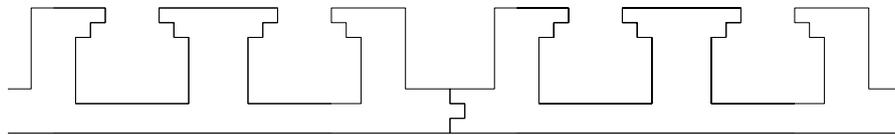
**Tabelle 4.18:** Hohlkastenträger, sieben einzelne Elemente, Mittelwerte und Standardabweichungen der Resonanzfrequenzen und Dämpfungen (berechnet aus Halbwertsbreite), Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f_{mittel}$<br>in Hz | $\sigma_f$ in<br>Hz | $D_{mittel}$<br>in % | $\sigma_D$ in<br>% | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--|
| 6   | 119.5                 | 1.2                 | 2.0                  | 0.1                |    |
| 7   | 139.6                 | 5.2                 | 2.2                  | 0.4                |    |
| 8   | 188.3                 | 6.2                 | 1.7                  | 0.2                |  |



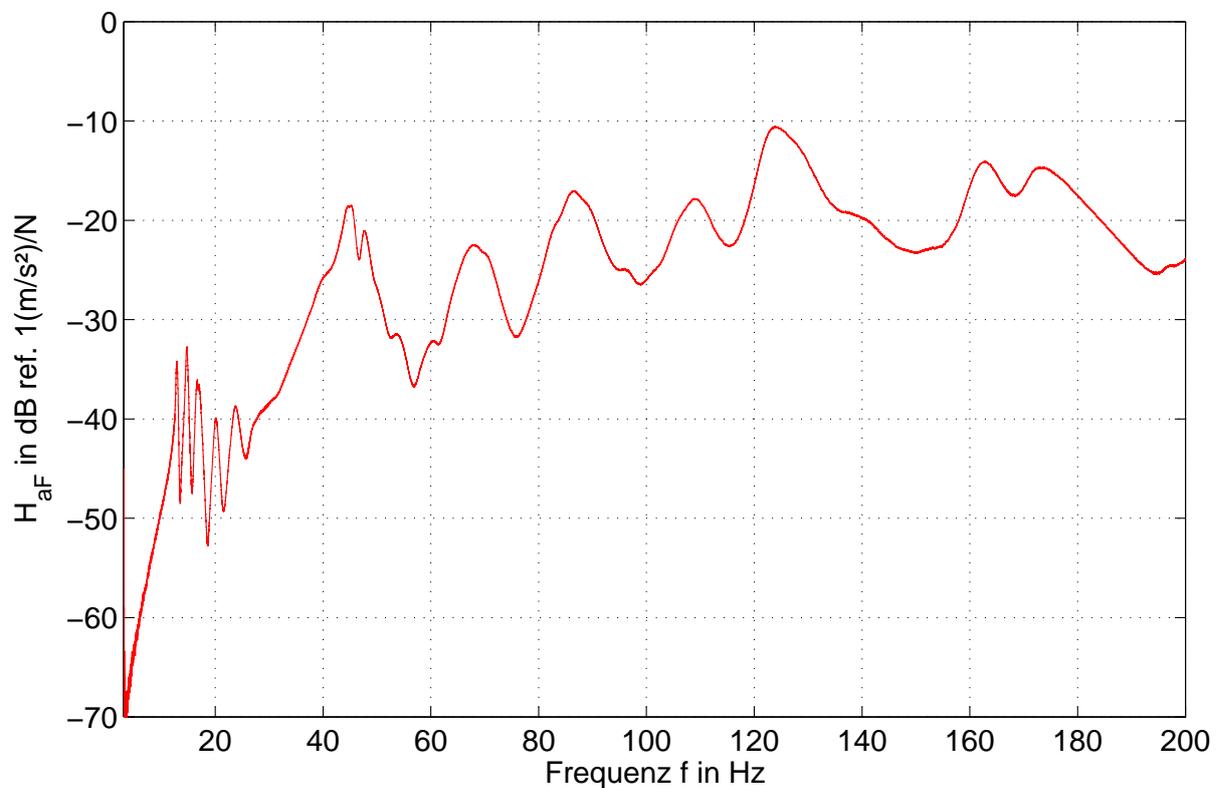
**Abbildung 4.64:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen. Die deutlichen Abweichungen in den Bereichen zwischen den Maxima sind durch die Hammermessung bedingt. Eine Anregung mit dem Schwingerreger könnte hier bessere Ergebnisse liefern, welche jedoch für die Auswertung der Resonanzfrequenzen nicht relevant sind.

### 4.3.2 Rohdecke



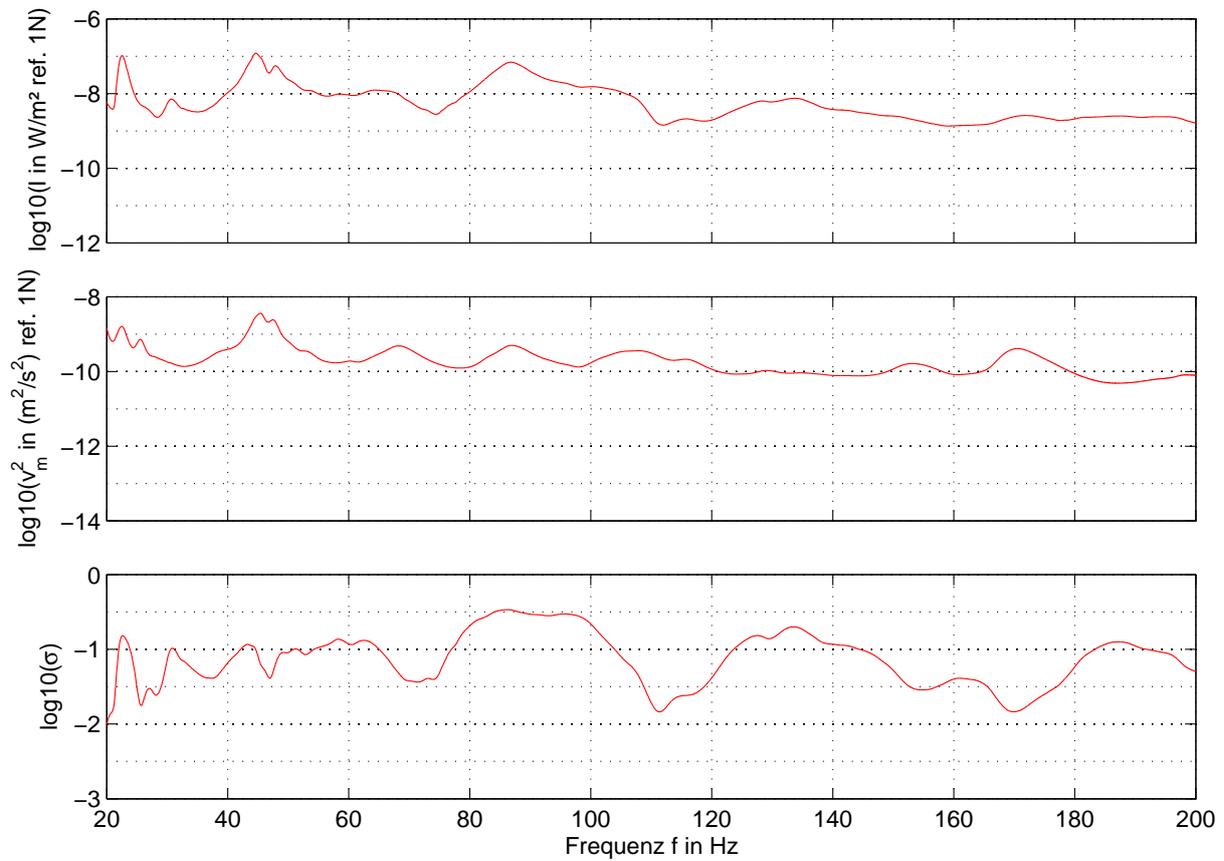
**Abbildung 4.65:** Rohdecke aus Hohlkastenträgerelementen. Spannweite:  $l = 5.50 \text{ m}$ , Breite  $b = 5.50 \text{ m}$ .

In Abb. 4.66 ist die Eingangsakzeleranz der Rohdecke abgebildet.



**Abbildung 4.66:** Eingangsakzeleranz von Rohdecke aus Hohlkastenträgerelementen, zweiseitig aufgelagert.

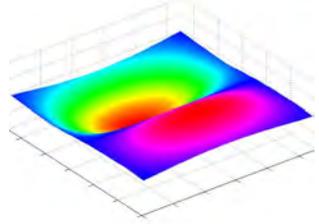
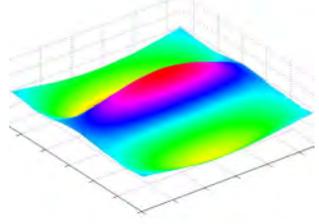
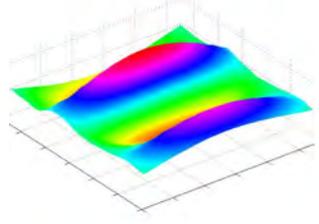
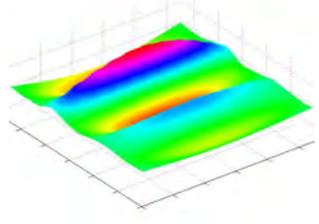
Die Ergebnisse der Messung der abgestrahlten Schallintensität  $I$  und des mittleren Schnellequadrates  $v^2$  auf der Oberfläche sind in Abb. 4.67 zusammengefasst.



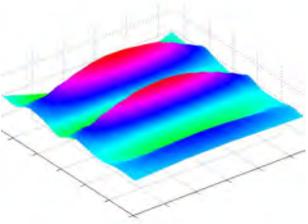
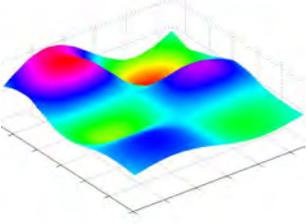
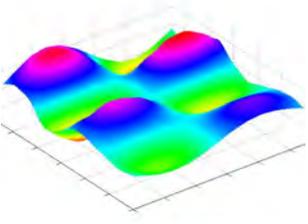
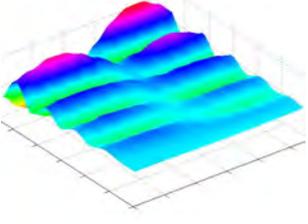
**Abbildung 4.67:** Vergleich der abgestrahlten Intensität mit dem mittleren Schnellequadrat auf der Unterseite der Rohdecke und Abstrahlgrad der Unterseite.

Tabelle 4.19 listet die Resonanzfrequenzen der Hohlkastenträgerdecke mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.68 entnommen werden.

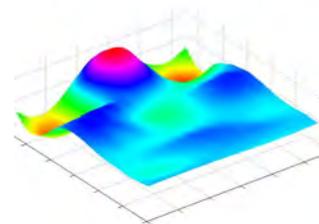
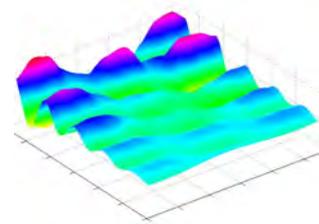
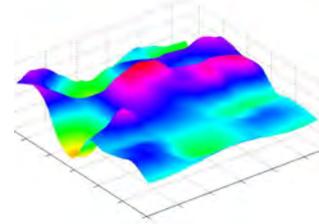
**Tabelle 4.19:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Hohlkastenträgerelementen, zweiseitig aufgelagert mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

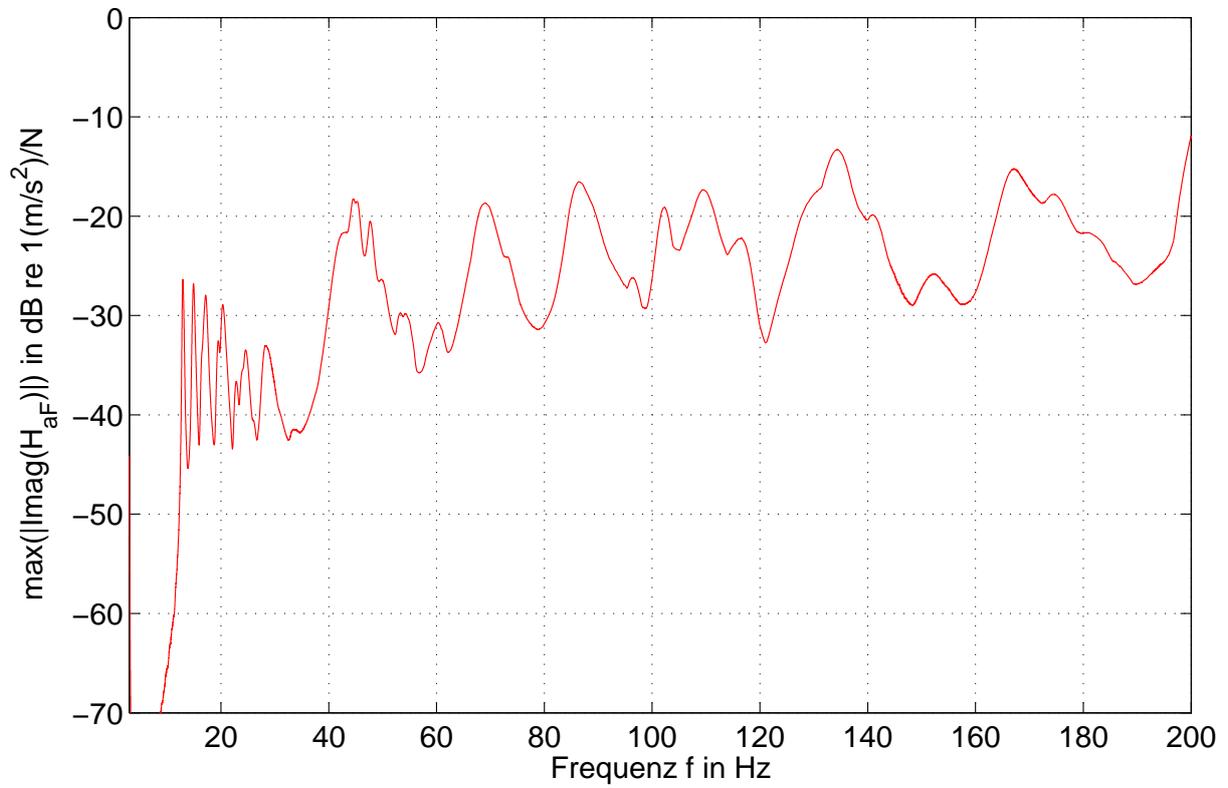
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 1   | 13.0        | 1.2      |    |
| 2   | 14.8        | 1.2      |   |
| 3   | 16.7        | 1.5      |  |
| 4   | 20.2        | 1.8      |  |

**Tabelle 4.19:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Hohlkastenträgerelementen, zweiseitig aufgelagert mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-------------|----------|--|
| 5   | 24.1        | 2.5      |    |
| 6   | 45.2        | 1.6      |   |
| 7   | 47.6        | —        |  |
| 8   | 68.5        | —        |  |

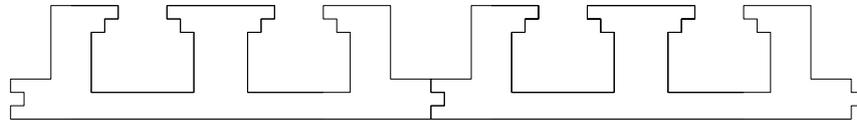
**Tabelle 4.19:** Resonanzfrequenzen Rohdecke aus Hohlkastenträgerelementen, zweiseitig aufgelagert mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform. Spannrichtung von links unten nach rechts oben.

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-------------|----------|--|
| 9   | 86.9        | —        |    |
| 10  | 109.1       | —        |   |
| 11  | 123.8       | 1.6      |  |



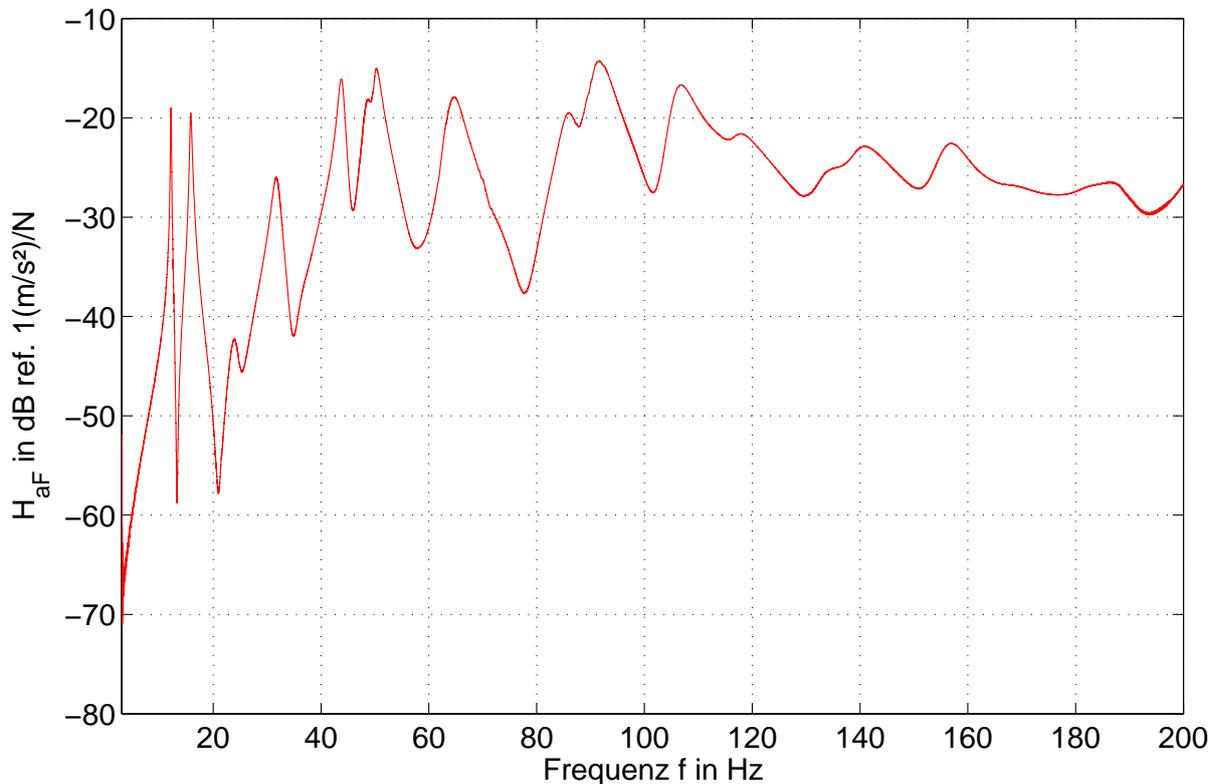
**Abbildung 4.68:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

### 4.3.3 Doppelement



**Abbildung 4.69:** zwei Elemente der Hohlkastenträgerdecke verbunden ohne weitere Anbauten und ohne Schüttung. Spannweite:  $l = 5.50\text{ m}$ , Breite  $b = 1.25\text{ m}$ .

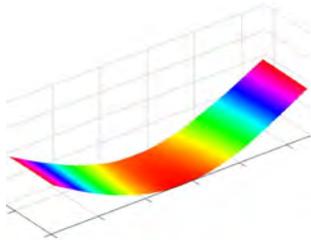
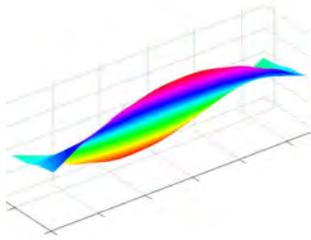
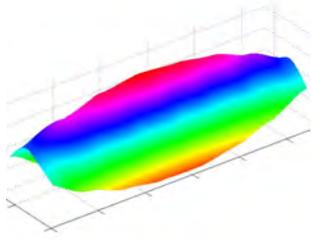
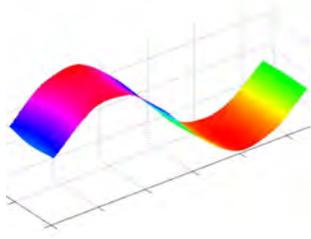
In Abb. 4.70 ist die Eingangsakzeleranz des Doppelementes abgebildet.



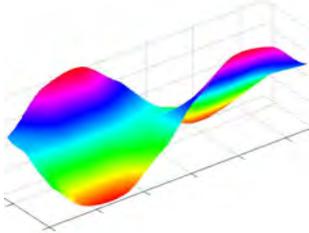
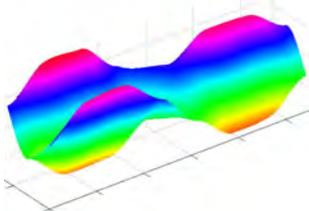
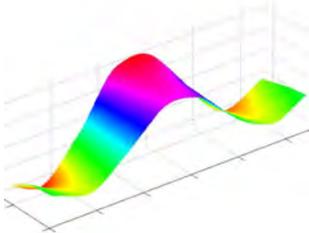
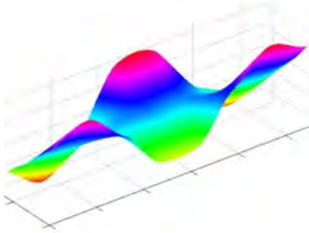
**Abbildung 4.70:** Eingangsakzeleranz von zwei verbundenen Hohlkastenträgerelementen.

Tabelle 4.20 listet die Resonanzfrequenzen des Doppelementes mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.71 entnommen werden.

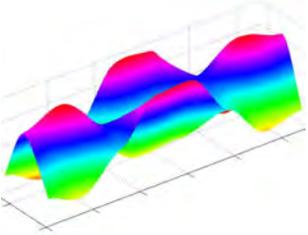
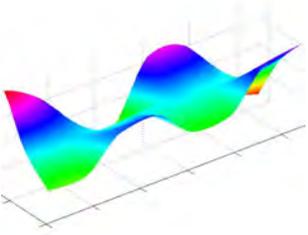
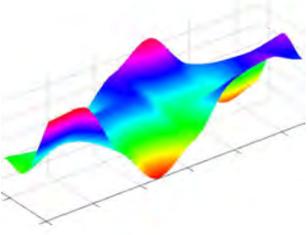
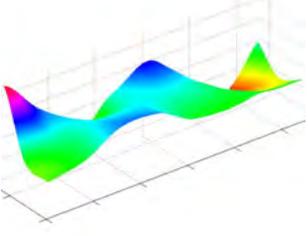
**Tabelle 4.20:** Resonanzfrequenzen zwei verbundene Hohlkastenträgerelemente mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-------------|----------|--|
| 1   | 12.2        | 0.6      |    |
| 2   | 15.8        | 0.9      |   |
| 4   | 31.9        | 1.8      |  |
| 5   | 43.9        | 1.0      |  |

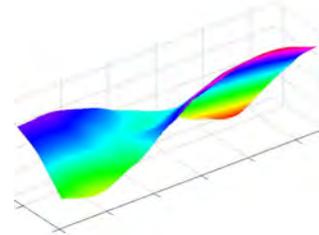
**Tabelle 4.20:** Resonanzfrequenzen zwei verbundene Hohlkastenträgerelemente mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

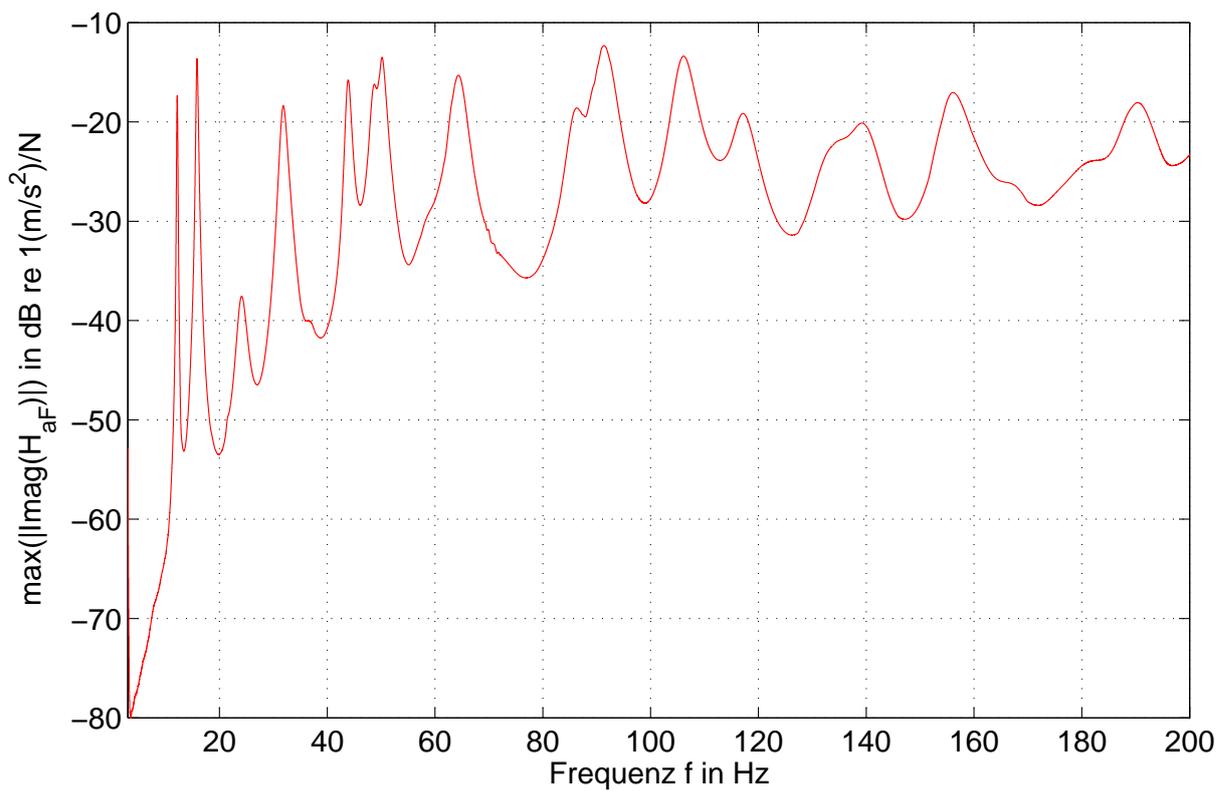
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 6   | 50.2        | 1.3      |    |
| 7   | 64.4        | 2.0      |   |
| 8   | 86.3        | —        |  |
| 9   | 91.5        | 1.7      |  |

**Tabelle 4.20:** Resonanzfrequenzen zwei verbundene Hohlkastenträgerelemente mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-------------|----------|--|
| 10  | 106.2       | 1.5      |    |
| 11  | 139.4       | —        |   |
| 12  | 155.4       | —        |  |
| 13  | 189.6       | 1.1      |  |

**Tabelle 4.20:** Resonanzfrequenzen zwei verbundene Hohlkastenträgerelemente mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

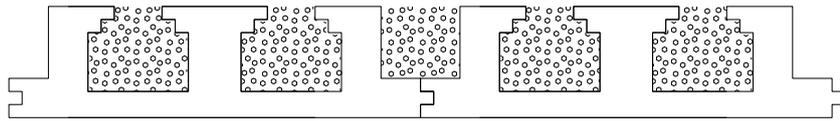
| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-----------|----------|--|
| 14  | 116.8     | —        |  |



**Abbildung 4.71:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

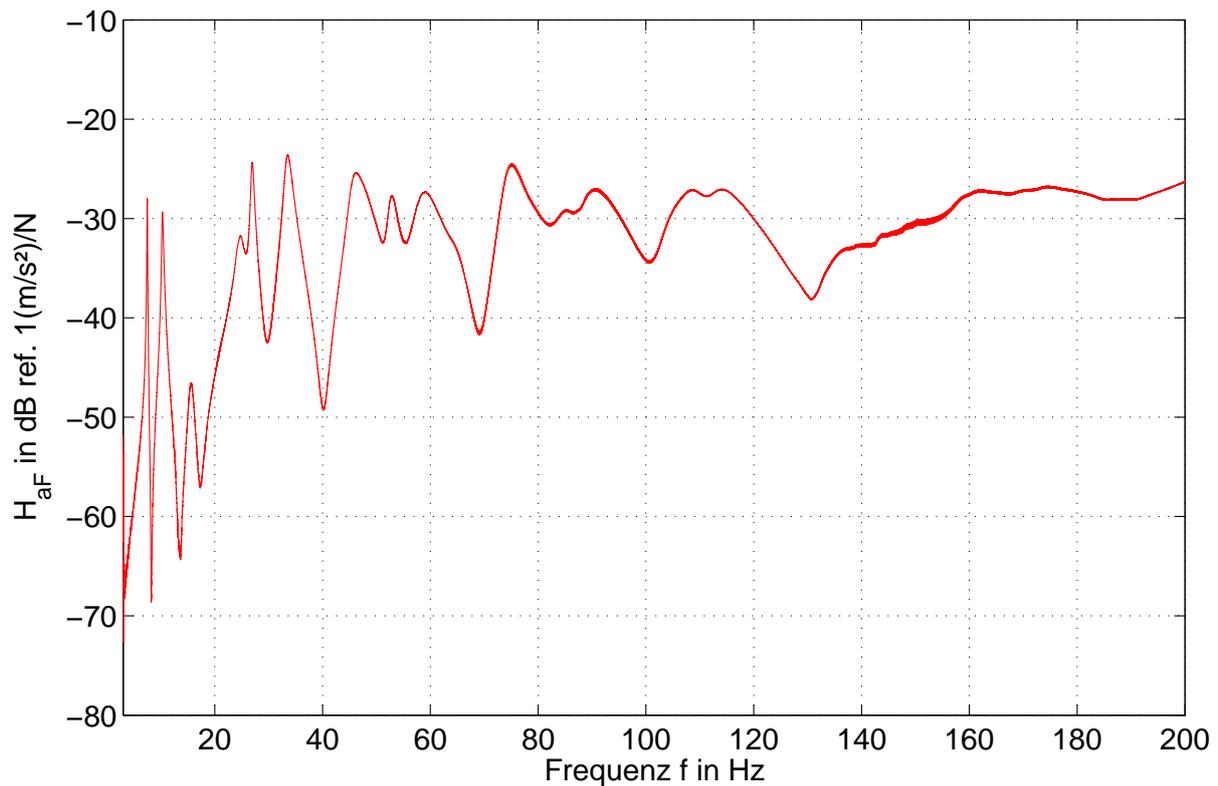
### 4.3.4 Doppелеlement mit Schüttung

Für eine weitere Untersuchung werden die Hohlräume der beiden Deckenelemente mit einer losen Splittschüttung gefüllt. Diese hat eine flächenbezogene Masse von  $m'_{\text{Schüttung}} = 98 \text{ kg/m}^2$ .



**Abbildung 4.72:** zwei Elemente der Hohlkastenträgerdecke verbunden mit Schüttung. Spannweite:  $l = 5.50 \text{ m}$ , Breite  $b = 1.25 \text{ m}$ .

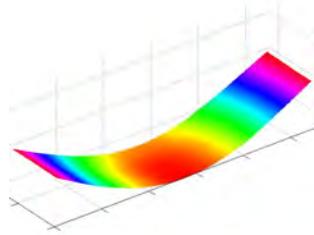
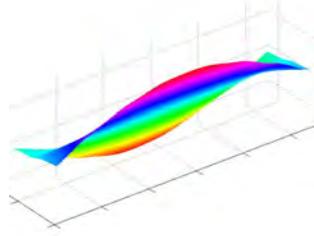
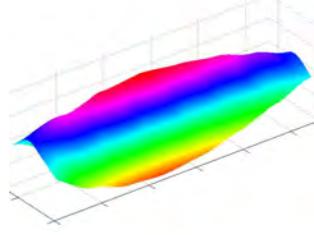
In Abb. 4.70 ist die Eingangsakzeleranz des Doppелеlementes mit Schüttung abgebildet.



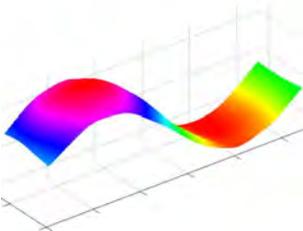
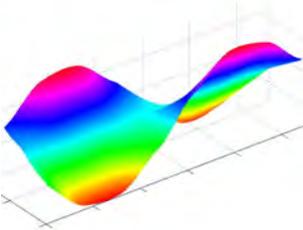
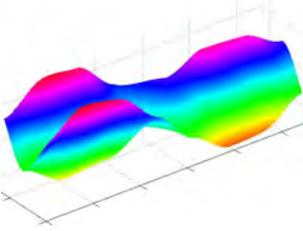
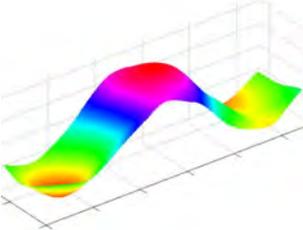
**Abbildung 4.73:** Eingangsakzeleranz von zwei verbundenen Hohlkastenträgerelementen gefüllt mit Splittschüttung.

Tabelle 4.21 listet die Resonanzfrequenzen des Doppелеlementes mit Schüttung mit den dazugehörigen Dämpfungswerten und Betriebsschwingungsformen auf. Die Maxima der Amplituden der Betriebsschwingungsformen können Abb. 4.74 entnommen werden.

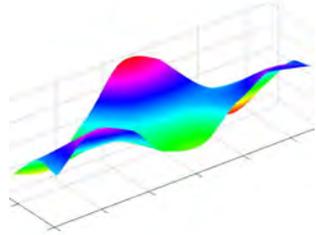
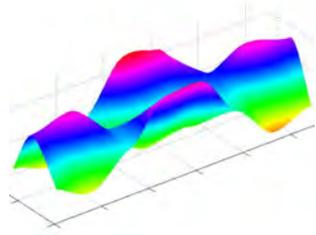
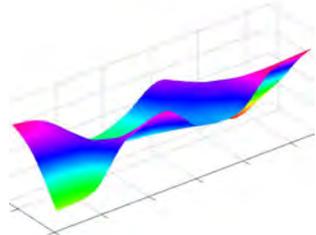
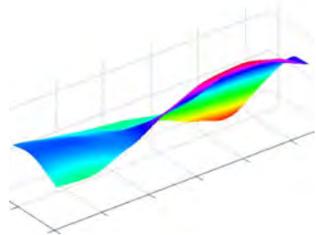
**Tabelle 4.21:** Resonanzfrequenzen zwei verbundene Hohlkastenträgerelemente mit Schüttung mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f$ in Hz | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-----------|----------|---|
| 1   | 7.5       | 0.8      |    |
| 2   | 10.3      | 1.0      |   |
| 3   | 25.1      | —        |  |

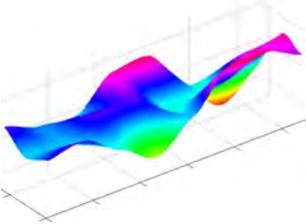
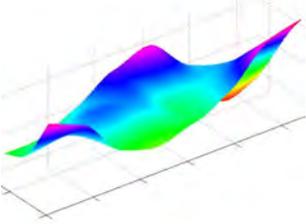
**Tabelle 4.21:** Resonanzfrequenzen zwei verbundene Hohlkastenträgerelemente mit Schüttung mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

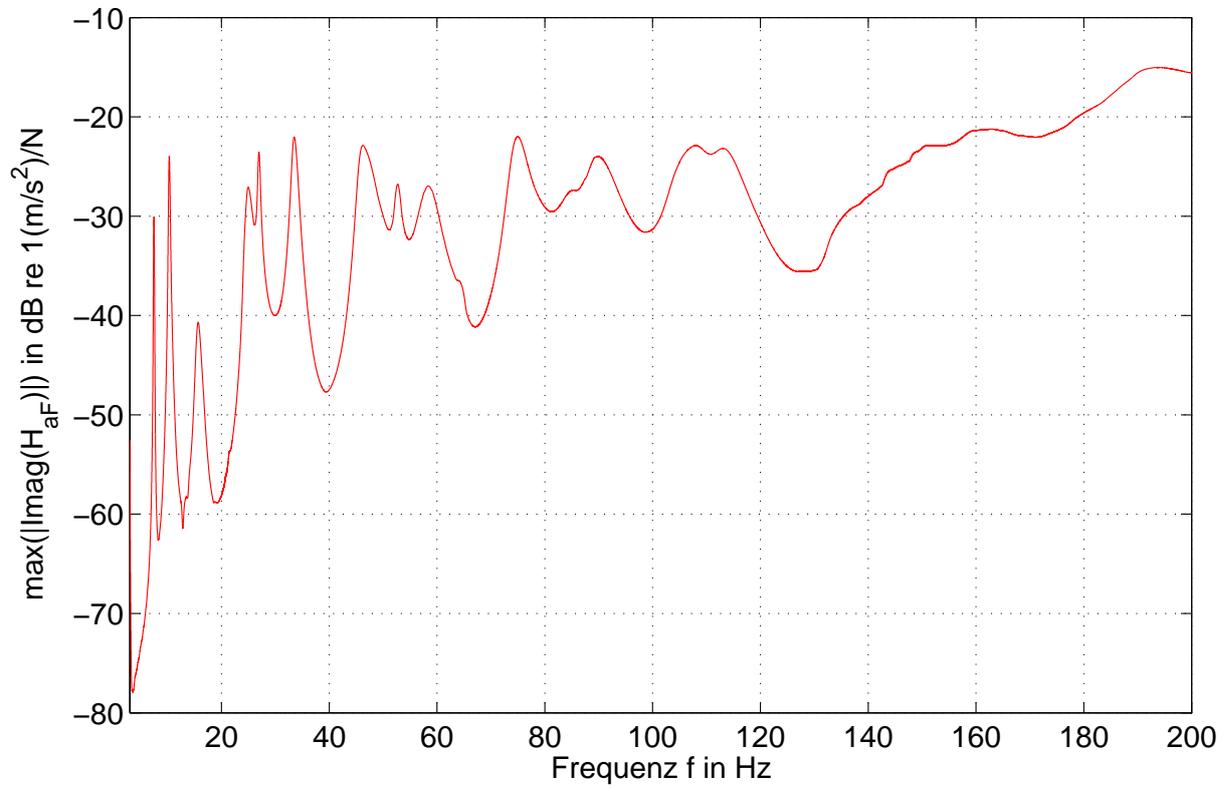
| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform  |
|-----|-------------|----------|--|
| 4   | 27.0        | 0.9      |    |
| 5   | 33.5        | 1.5      |   |
| 6   | 46.3        | 2.1      |  |
| 7   | 52.7        | 1.7      |  |

**Tabelle 4.21:** Resonanzfrequenzen zwei verbundene Hohlkastenträgerelemente mit Schüttung mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 8   | 58.4        | —        |    |
| 9   | 75.0        | 1.8      |   |
| 10  | 84.9        | —        |  |
| 11  | 89.4        | —        |  |

**Tabelle 4.21:** Resonanzfrequenzen zwei verbundene Hohlkastenträgerlemente mit Schüttung mit zugehöriger Dämpfung (berechnet aus Halbwertsbreite) und Betriebsschwingungsform

| Nr. | $f$ in $Hz$ | $D$ in % | Betriebsschwingungsform   |
|-----|-------------|----------|---|
| 12  | 107.9       | —        |   |
| 13  | 112.9       | —        |  |



**Abbildung 4.74:** Verlauf der Maximalwerte der Amplituden der Betriebsschwingformen.

### 4.3.5 Vergleich des Doppелеlementes mit und ohne Schüttung

Ein Vergleich der Maxima aus den Betriebsschwingformen und der Dämpfungen der zwei Elemente mit und ohne Schüttung findet sich in Abb. 4.75 und 4.76. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Resonanzfrequenzen durch die zusätzliche Masse der Schüttung deutlich in Richtung der tieferen Frequenzen verschieben. Die Decke lässt sich durch die höhere Masse schwerer anregen (geringere Eingangszeleranz). Des Weiteren steigt die Dämpfung durch die aufgebraachte Schüttung um ca. 0.5 %.

Durch die Massenerhöhung ergibt sich rechnerisch ein Frequenzverhältnis von:

$$\frac{f_{oS}}{f_{mS}} = \sqrt{\frac{m'_{oS}}{m'_{mS}}} \quad (4.2)$$

$f_{oS}$  : Resonanzfrequenz ohne Schüttung

$f_{mS}$  : Resonanzfrequenz mit Schüttung

$m'_{oS}$  : flächenbezogene Masse der Decke mit Unterdecke ohne Schüttung

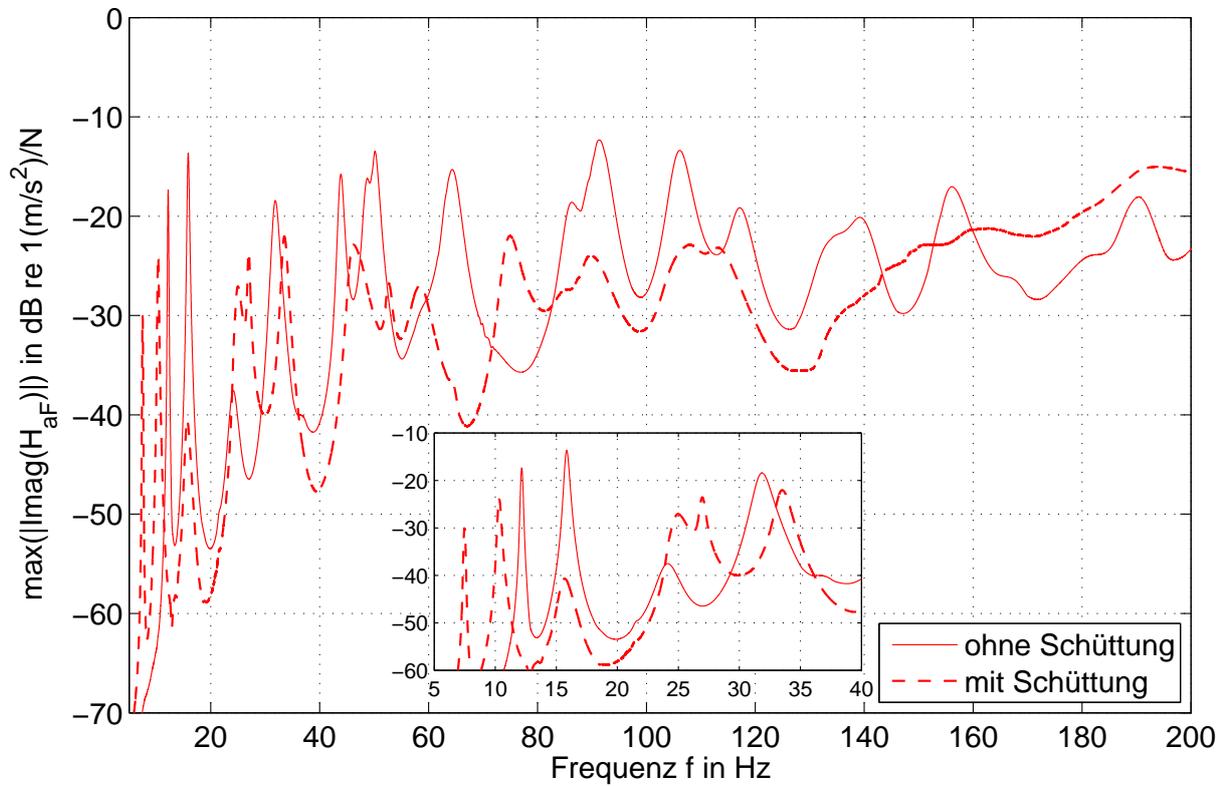
$m'_{mS}$  : flächenbezogene Masse der Decke mit Unterdecke und Schüttung

Bei dem hier untersuchten Deckensystem mit  $m'_{oS} = 46 \text{ kg/m}^2$  und  $m'_{mS} = 144 \text{ kg/m}^2$  ergibt sich eine Verschiebung um von  $\frac{f_{oS}}{f_{mS}} = 0.68$ .

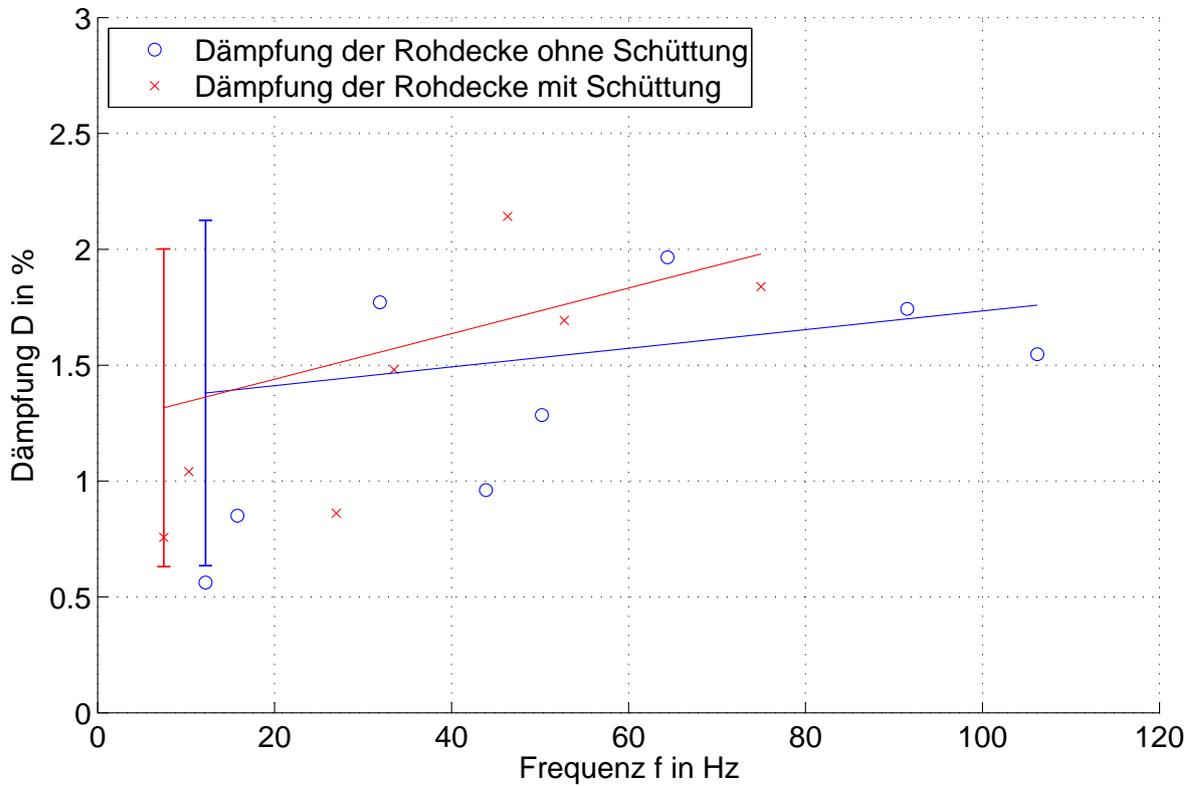
Tabelle 4.22 zeigt den Vergleich der ersten vier Resonanzfrequenzen der beiden Systeme und deren Verhältnisse. Es ist zu erkennen, dass das Frequenzverhältnis bei drei der ersten vier Resonanzfrequenzen etwas kleiner ist als durch die Massenerhöhung zu erwarten. Dies kann durch eine etwas abgeänderte Schwingform bedingt sein.

**Tabelle 4.22:** Vergleich der ersten vier Resonanzfrequenzen der Hohlkastenträger ohne Schüttung und mit Schüttung

| $f_{mit\ Schuett}$ | $f_{ohne\ Schuett}$ | $f_{ohne}/f_{mit}$ |
|--------------------|---------------------|--------------------|
| 12.2               | 7.5                 | 0.61               |
| 15.8               | 10.3                | 0.65               |
| 31.9               | 25.1                | 0.79               |
| 43.9               | 27.0                | 0.62               |



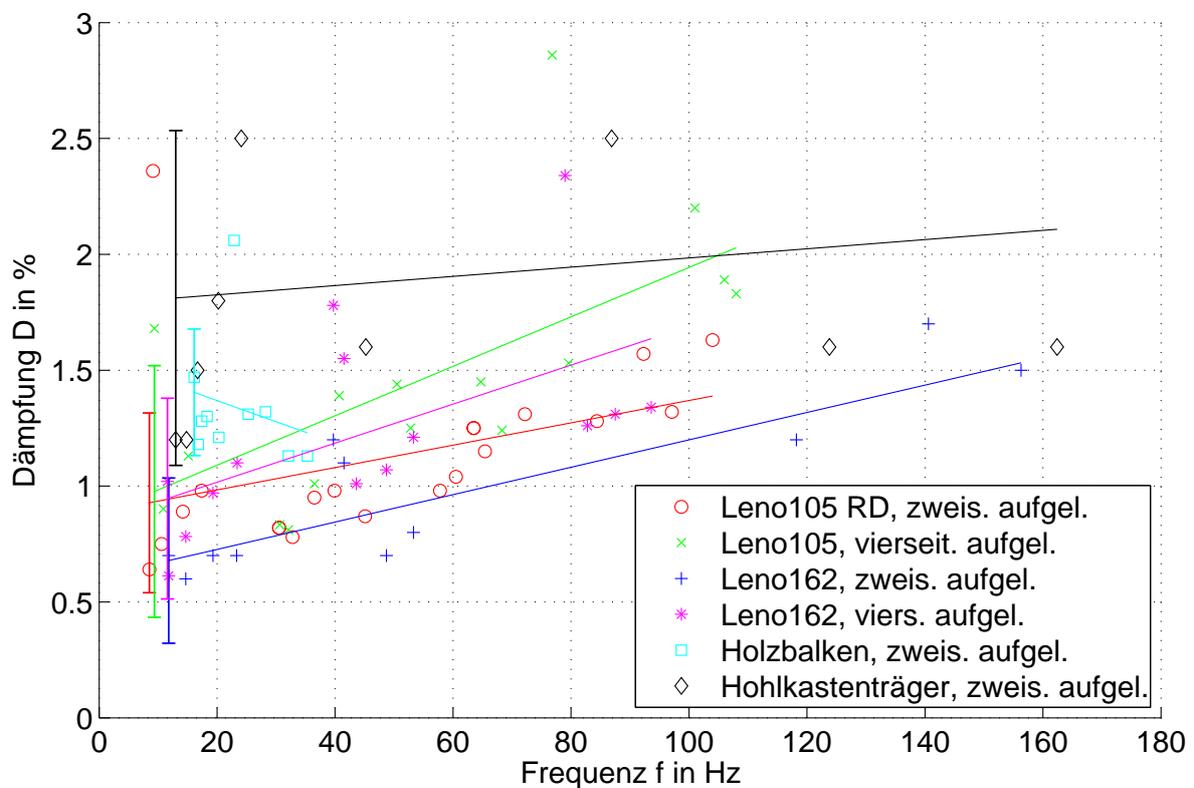
**Abbildung 4.75:** Vergleich der Maxima der Betriebsschwingformen der zwei verbundenen Hohlkastenträger mit und ohne Schüttung.



**Abbildung 4.76:** Vergleich der Dämpfungswerte und Resonanzfrequenzen der Hohlkastenträgerelemente mit und ohne Schüttung. Aufgetragen sind punktwise die Werte für die Dämpfung über den Resonanzfrequenzen mit den dazugehörigen Ausgleichsgeraden. Die senkrechten Balken zu Beginn der Ausgleichsgeraden markieren den Bereich der Standardabweichung.

## 4.4 Vergleich der Dämpfungen der untersuchten Deckenkonstruktionen

Abb. 4.77 zeigt einen Vergleich der Dämpfungen aller Rohdeckenkonstruktionen. Es ist ersichtlich, dass bis auf die Hohlkastenträgerdecke alle Konstruktionen im Bereich der ersten Resonanzfrequenz eine Dämpfung von ca.  $1\% \pm 0.5\%$  aufweisen. Die Dämpfung der Hohlkastenträgerdecke ist deutlich höher.



**Abbildung 4.77:** Vergleich der Dämpfungen der untersuchten Rohdeckenkonstruktionen. Aufgetragen sind punktwise die Werte für die Dämpfung über den Resonanzfrequenzen mit den dazugehörigen Ausgleichsgeraden. Die senkrechten Balken zu Beginn der Ausgleichsgeraden markieren den Bereich der Standardabweichung.

In den Tabellen 4.23 bis 4.25 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der für die Dämpfungen der Rohdecken im Frequenzbereich von 4 Hz bis 20 Hz aufgeführt.

**Tabelle 4.23:** Dämpfungsmaße der Rohdecken aus Brettsperrholz im Frequenzbereich bis 20 Hz als Rohdecke (RD) und in Kombination mit Unterdecke (UD), Fließestrich (FE) und Trockenestrich (TE)

| RD            | RD UD         | RD FE         | RD TE         | RD UD FE      | RD UD TE      |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|               |               |               |               |               |               |
| 0.7 % ± 0.1 % | 1.5 % ± 0.4 % | 1.6 % ± 0.1 % | 2.1 % ± 0.2 % | 1.5 % ± 0.8 % | 1.9 % ± 0.6 % |

**Tabelle 4.24:** Dämpfungsmaße der Holzbalkendecke im Frequenzbereich bis 20 Hz als Rohdecke (RD) und in Kombination mit Unterdecke (UD), Trockenestrich (TE) und Schüttung (STG)

| RD            | RD UD         | RD UD TE      | RD UD TE STG  |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
|               |               |               |               |
| 1.3 % ± 0.1 % | 1.6 % ± 0.6 % | 1.8 % ± 0.2 % | 1.5 % ± 0.7 % |

**Tabelle 4.25:** Dämpfungsmaße der Hohlkastenträgerdecke als Rohdecke (RD), Doppелеlement (DE) und Doppелеlement mit Schüttung (STG)

| RD            | DE            | DE STG        |
|---------------|---------------|---------------|
|               |               |               |
| 1.3 % ± 0.1 % | 0.7 % ± 0.2 % | 1.5 % ± 1.1 % |

## 5 Schwingungstilger

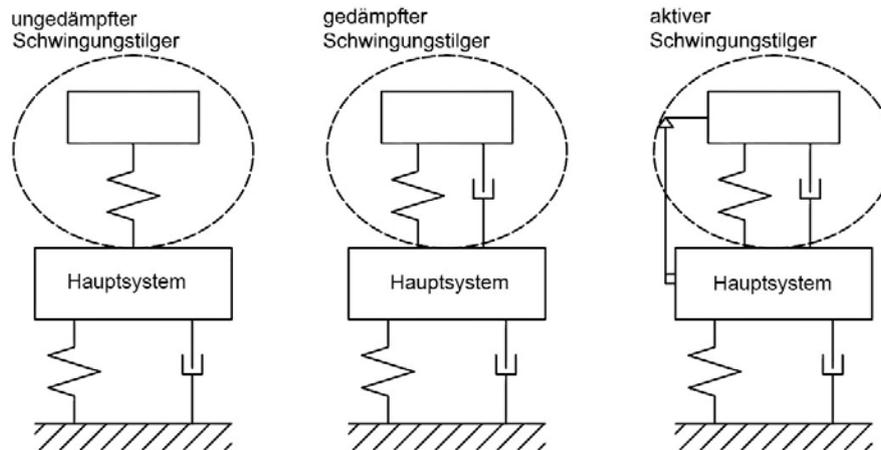
Schwingungstilger werden im Hochbau vor allem zur Reduzierung von Schwingungen bei Brücken und in Hochhäusern eingesetzt. Passive Schwingungstilger wirken als gedämpfte Masse-Feder-Systeme. In Abb. 5.1 sind die unterschiedlichen Tilgungsprinzipien dargestellt.

Der Einsatz von Schwingungstilgern in Holzdeckenkonstruktionen wurde bereits in mehreren Arbeiten der Hochschule Rosenheim untersucht [45, 46, 9]. Im Rahmen des hier beschriebenen Vorhabens wird die Auslegung und Konstruktion der Schwingungstilger optimiert. Außerdem wird der Einsatz von Schwingungstilgern auf der abgehängten Unterdecke untersucht, um diese auf eine Reduzierung der abgestrahlten Schallleistung zu optimieren.

### 5.1 Grundlagen [25]

Die Richtlinie VDI 3833-2 definiert einen Schwingungstilger als *ein zusätzlich an einem Hauptsystem angebautes Bauelement, das aus einer Masse und einer Feder besteht und gezielt den Tilgereffekt nutzt* [55]. Das in seiner Schwingung zu reduzierende Hauptsystem wird als Einmassenschwinger betrachtet. Mittels einer Feder mit der Federkonstante  $k_T$  wird eine auf das Hauptsystem abgestimmte Tilgermasse  $m_T$  an dieses angekoppelt. Wenn die Eigenfrequenz  $f_T$  des Tilgers der Eigenfrequenz des Hauptsystems  $f_H$  entspricht ist es möglich, dass letzteres in seiner Schwingungsauslenkung deutlich reduziert wird.

Die Wirkungsweise und die Dimensionierung eines Schwingungstilgers können anhand des Modells eines Zweimassenschwingers erläutert werden, wobei die eine Masse das Hauptsystem (Bauwerk)  $m_H$  und die andere Masse den Tilger  $m_T$  darstellt (s. Abb. 5.2). Über die Parameter  $m_T$ ,  $k_T$  und  $c_T$  für den Tilger und  $m_H$ ,  $k_H$  und  $c_H$  für das Hauptsystem ( $m$ : Masse,  $k$ : Federkonstante,  $c$ : Dämpfungskoeffizient) kann das Verhalten eines Zweimassenschwingers abgebildet werden. Die Bewegungsgleichungen für die Auslenkungen  $u$  für diesen Zweimassenschwinger



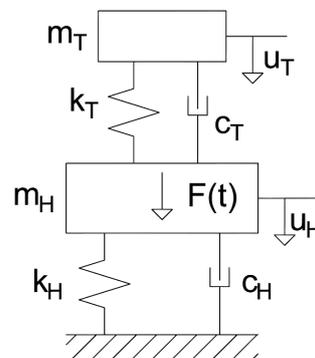
**Abbildung 5.1:** Tilger passiv: ungedämpft(links), gedämpft(Mitte); Tilger aktiv(rechts)

sind:

$$m_H \cdot \ddot{u}_H + c_H \cdot \dot{u}_H + c_T \cdot (\dot{u}_H - \dot{u}_T) + k_H \cdot u_H + k_T \cdot (u_H - u_T) = F(t) \quad (5.1)$$

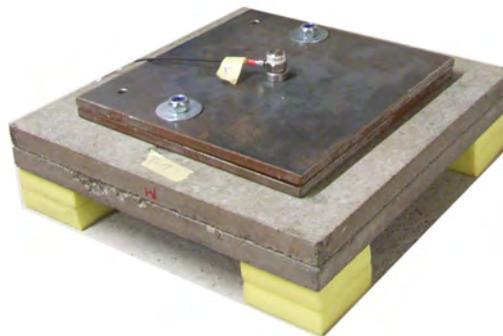
und:

$$m_T \cdot \ddot{u}_T + c_T \cdot (\dot{u}_T - \dot{u}_H) + k_T \cdot (u_T - u_H) = 0 \quad (5.2)$$

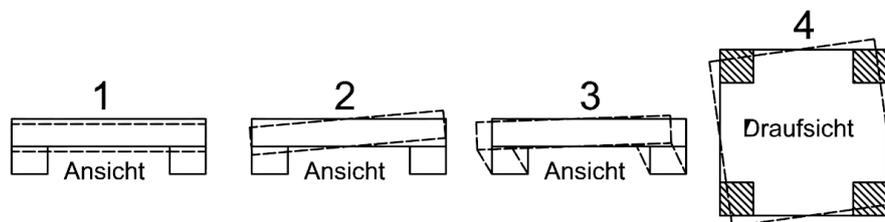


**Abbildung 5.2:** Darstellung der Wechselwirkung zwischen Hauptsystem und Tilger als Zweimassenschwinger.

Eine ausführliche Lösung dieser Bewegungsgleichungen findet sich z.B. bei Petersen [44]. In der Praxis werden Tilger in aller Regel mit definierter Dämpfung an das Ausgangssystem angekoppelt. Die Dämpfung des Tilgers verringert zwar die Tilgung der Schwingung des Hauptsystems, erleichtert aber die Dimensionierung des Schwingungstilgers. Im Baubereich ist bei



**Abbildung 5.3:** Beispiel für einen Tilger, konstruiert aus Feder-Dämpfer-Elementen aus Sylomer SR11 und einer Masse aus Stein- und Stahlplatten.



**Abbildung 5.4:** Freiheitsgrade eines einfachen Tilgers aus einer Platte (Masse) und vier Elastomeren (Feder und Dämpfer). Nr. 2 und Nr. 3 sind jeweils zwei Freiheitsgrade, da sie in zwei Richtungen auftreten.

der genauen Eingrenzung der Eigenfrequenz des Hauptsystems zu beachten, dass eine Veränderung in der Konstruktion (auch durch den Einsatz von Tilgern) oder der Verkehrslasten immer eine Verstimmung des Ausgangssystems nach sich zieht. Hier wirkt sich der Effekt einer größeren Resonanzbreite des gedämpften Tilgers positiv aus.

Bei den hier betrachteten Schwingungstilgern (s. Abb. 5.3) werden für die Feder-Dämpfer-Elemente Elastomere der Firma Getzner (Sylomer) verwendet. Die Massen bestehen aus Stahl-, Blei- oder Steinplatten und stehen auf jeweils vier dünnen Elastomerlagern. Sie besitzen sechs Freiheitsgrade für einen Doppelsymmetrischen Tilger (s. Abb. 5.4). Die Schwingformen 2 und 3 treten dabei in zwei Raumrichtungen auf. Die Schwingform 1 (Longitudinalschwingung) stellt die für das Tilgungsverhalten relevante Schwingung dar, bei der die Masse des Tilgers ohne Kippen oder Verdrehen gleichmäßig auf und ab schwingt. Die Schwingformen 2 und 3 (Kipp-schwingungen) haben tiefe Eigenfrequenzen, die sich im Bereich der Eigenfrequenz der ersten Schwingform befinden [40]. Die vierte Schwingform kann für die geplante Anwendung in der Regel außer Acht gelassen werden. Solange der Tilger gerade aufgestellt wird, werden sich

aufgrund der Fußpunkterregung durch die Decke kaum Verdrehungen einstellen. Somit kann man sich häufig auf die Eigenfrequenz der ersten Schwingform beschränken.

Für weitere Betrachtungen wird Folgendes festgelegt:

Eigenfrequenz der Decke bzw. der Tilger:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.3)$$

Massenverhältnis Masse Tilger  $m_T$  zu Masse des Hauptsystems  $m_H$ :

$$\mu = \frac{m_T}{m_H} \quad (5.4)$$

In der Praxis hat sich für die Tilgerparameter die Auslegung nach Den Hartog [12] bewährt. Sie sind für ein ungedämpftes Hauptsystem ausgelegt, aber auch für schwach gedämpfte Systeme genügend genau.

Optimale Tilgerfrequenz:

$$f_T = f_{opt} = \frac{f_H}{1 + \mu} \quad (5.5)$$

Optimale Verstimmung:

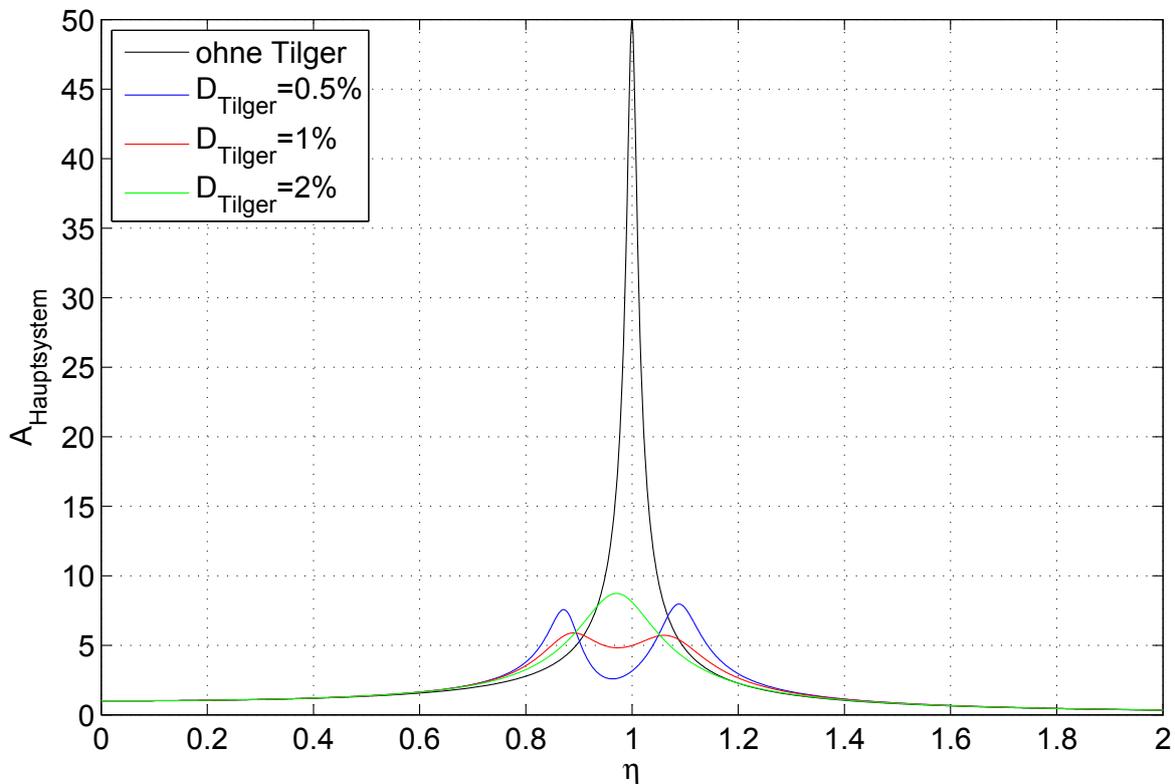
$$\kappa_T = \kappa_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (5.6)$$

Optimaler Dämpfungsgrad:

$$D_T = D_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8 \cdot (1 + \mu)^3}} \quad (5.7)$$

Der Einfluss von Dämpfungsgrad, Massenverhältnis und das Maß der Verstimmung auf die Reduktion der Schwingungen von Holzdeckensystemen wurde von Reichelt [45, 46] näher untersucht.

Abbildung 5.5 zeigt die Wirkungsweise Tilgern mit unterschiedlicher Dämpfung auf ein Hauptsystem.



**Abbildung 5.5:** Vergrößerungsfunktion eines Hauptsystems ohne Tilger und bei Einsatz eines Tilgers mit unterschiedlicher Dämpfung von 0.5%, 1% und 2%. Das Masseverhältnis  $\mu$  ist hier  $\mu = \frac{5}{100}$ . Das Verhältnis zwischen der dargestellten Frequenz und der Resonanzfrequenz des Hauptsystems wird mit  $\eta = \frac{f}{f_{Res}}$  dargestellt. Die Amplitude des Systems ist auf die Amplitude der Fußpunkterregung referenziert.

## 5.2 Kontruktion der Tilger [25]

Die in Abb. 5.3 dargestellte Bauart wurde bereits von Reichelt [46] und Brinkmann [9] verwendet und kann relativ einfach und kostengünstig hergestellt werden.

### 5.2.1 Feder-Dämpfer-Elemente

Als kombinierte Feder-Dämpfer-Elemente kommen gemischtzellige Polyurethanschäume vom Typ Sylomer der Firma Getzner Werkstoffe GmbH zum Einsatz. Es wird versucht mit nur einem Materialtyp alle Tilger zu konstruieren. Aufgrund der Masse der Tilger und der erforderlichen

Resonanzfrequenzen kommen nur wenige Typen des Werkstoffes Sylomer in Frage. Des Weiteren sollen die Auflager möglichst dünn werden, um eine hohe Kippstabilität zu erreichen. Aus diesem Grunde wird für alle Tilger das Material Sylomer SR11 in verschiedenen Abmessungen verwendet. Genauere Daten und Betrachtungen zur Auslegung der Tilger mit Sylomer finden sich in [25] und [20]. In Kapitel 5.3 folgen Untersuchungen zu verschiedenen Materialparametern der Tilgerauflagerung.

## 5.2.2 Masse

Sollen die Tilger im Deckenaufbau integriert werden, müssen für die Massen Materialien mit einer möglichst hohen Rohdichte verwendet werden, um eine geringe Aufbauhöhe zu erreichen. Dazu sind Platten aus Stahl oder Blei am besten geeignet. Für die hier untersuchten Tilger werden Gehwegplatten und zementgebundene Spanplatten in Kombination mit Metallplatten verwendet. Die Aufbauhöhe der Tilger ist für die hier durchgeführten Untersuchungen nicht relevant, da diese auf der Rohdecke ohne weiteren Aufbau platziert werden.

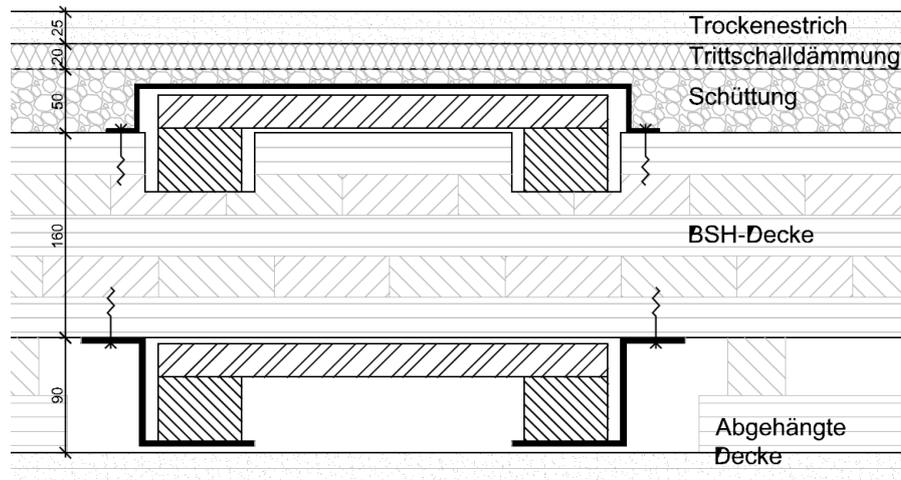
## 5.2.3 Auslegung der Tilger

Die Masse des Tilgers wird auf die Masse der Decke abgestimmt. In der Literatur wird die Tilgermasse mit ca. 3 % bis 8 % der modalen Masse der Decke beschrieben [40]. Dieser Zusammenhang wurde bereits in [46] an der Hochschule Rosenheim untersucht und für sinnvoll erachtet. Aus diesem Grund werden alle hier untersuchten Tilger auf ca. 5 % der modalen Masse ausgelegt.

Die modale Masse der Decke ist abhängig von deren Auflagerung. Holzdecken sind im Normalfall meist zweiseitig gelenkig gelagert. Einen Sonderfall können Durchlaufträger darstellen. Hier kann der Bereich in dem der Träger durchläuft auch als eingespannt angenommen werden. Die modalen Massen  $m_{mod}$  in Abhängigkeit von der Gesamtmasse  $m_{tot}$  der Decke finden sich in Tabelle 5.1.

**Tabelle 5.1:** Modale Masse der ersten Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Auflagerung [49]

|                        |                                |
|------------------------|--------------------------------|
| zweiseitig gelenkig    | $m_{mod} = 0.50 \cdot m_{tot}$ |
| vierseitig gelenkig    | $m_{mod} = 0.25 \cdot m_{tot}$ |
| zweiseitig eingespannt | $m_{mod} = 0.20 \cdot m_{tot}$ |
| vierseitig eingespannt | $m_{mod} = 0.17 \cdot m_{tot}$ |



**Abbildung 5.6:** Mögliche Integrationsvarianten von Tilgern in Massivholzdecken. Bei der Platzierung im Bereich der Schüttung muss der Tilger sicher gegen diese geschützt sein. Bei der Abhängung unter der Rohdecke muss die Aufhängung ausreichen steif sein.

Der Werkstoff Sylomer weist ein nichtlineares Werkstoffverhalten auf. Aus diesem Grund wird von der Firma Getzner die Online-Bemessungssoftware *freqcalc* [18] zur Verfügung gestellt, mit der die Resonanzfrequenzen der Tilger in guter Näherung bestimmt werden können.

Messtechnisch werden im Rahmen des Vorhabens ausschließlich Tilger untersucht, welche aus einer rechteckigen, plattenförmigen Masse in Kombination mit vier an den Ecken platzierten Auflagern konstruiert sind. In Hanke [25] finden sich weitere Untersuchungen zu verschiedenen Tilgerformen und Kombinationen welche hier nicht weiter ausgeführt werden.

Ebenso werden keine speziellen Einbauvarianten untersucht. Eine volle Integration in eine Massivholzdecke wird in [9] näher beschrieben. Weiterhin ist ein Einbau im Bereich zwischen Rohdecke und Unterdecke bei einer Massivholzdecke denkbar (s. Abb. 5.6). Bei Holzbalkendecken besteht die Möglichkeit, Tilger im Gefach zwischen den Balken zu integrieren. Bei Hohlkastenkonstruktionen bietet sich der Hohlraum an. Ein Einbau in der Schüttung ist ebenfalls möglich wenn der Tilger durch eine entsprechende Einhausung von dieser getrennt wird (s. Abb. 5.6). Unabhängig von der gewählten Methode ist vor allem sicher zu stellen, dass der Tilger ausreichend steif mit dem Hauptsystem verbunden ist. Dies ist gegeben, wenn er direkt auf dem Hauptsystem platziert wird. Wird er z.B. auf zusätzlichen Konsolen unter die Rohdecke gehängt, so müssen diese entsprechend steif konstruiert sein.

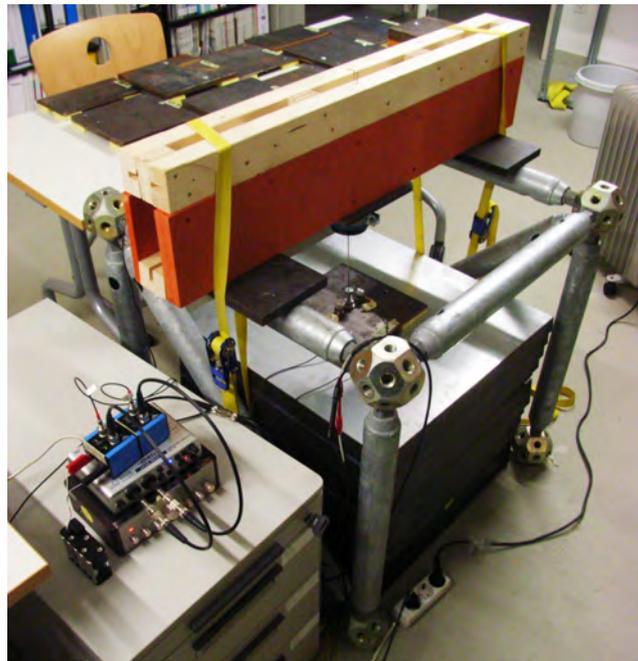
## 5.3 Messtechnische Untersuchung der Tilger

### 5.3.1 Tilgerprüfstand

Zur Überprüfung der Tilgerauslegung hinsichtlich der Resonanzfrequenz wird ein Prüfstand konstruiert, welcher eine Messung der Resonanzfrequenz der Tilger ermöglicht (s. Abb. 5.7). Dieser besteht aus einem steifen Stahlrahmen, in den auf der Oberseite ein elektrodynamischer Schwingerregger vom Typ 4810 der Firma Brüel & Kjaer eingebaut ist. Dieser regt über einen Stößel den zu messenden Tilger an. Die Beschleunigung des Tilgers wird mit zwei Beschleunigungsaufnehmern aufgenommen. Über zwei Vorverstärker mit integrierter ICP-Spannungsvorsorgung wird das Messsignal verstärkt und mit Hilfe einer externen Soundkarte in MATLAB<sup>®</sup> aufgezeichnet. Der Schwingerregger wird mit einem logarithmischen Gleitsinus betrieben, welcher in MATLAB<sup>®</sup> generiert und über die Soundkarte ausgegeben wird. Da kein Kraftaufnehmer für die Messung zur Verfügung steht, kann die gemessene Beschleunigung lediglich auf den Frequenzgang des Gleitsinus referenziert werden. Eine Kalibrierung der gemessenen Beschleunigung ist ebenfalls nicht möglich, weshalb die gemessenen Beschleunigungen auf die maximale Beschleunigung bei der Resonanzfrequenz bezogen werden. Aus den Messergebnissen kann mit ausreichender Genauigkeit die Resonanzfrequenz des gemessenen Tilgers, dessen Resonanzbreite bei  $-3 \text{ dB}$  und die daraus resultierende Dämpfung ermittelt werden (s. Abb. 5.8). Vergleichsmessungen mit einem kalibrierbaren Messsystem und mit Verwendung eines Kraftaufnehmers zur Messung der anregenden Kraft ergeben eine Abweichung von ca. 3%. Aufgrund der zu erwartenden Materialschwankungen des Sylomeres stellt dies für die gegebene Anwendung eine ausreichende Genauigkeit dar.

### 5.3.2 Vergleich Messung vs. Auslegung

Für die im folgenden Kapitel beschriebenen Versuche werden insgesamt 50 Tilger konstruiert und gebaut, um die Eigenschwingungen der Brettsperrholz-Decke aus Leno105 im Bereich zwischen  $8 \text{ Hz}$  und  $100 \text{ Hz}$  zu tilgen. Nach dem Bau der Tilger werden deren Eigenfrequenzen im Tilgerprüfstand gemessen und mit den zuvor in *freqcalc* [18] berechneten Werten verglichen (s. Abb. 5.9). Beim Bau der ersten 20 Tilger wurde dabei eine Charge Sylomer verwendet, deren Steifigkeitswerte an der oberen Grenze des von Getzner als zulässig angesehenen Steifigkeitsbereiches liegen. Dadurch sind die erreichten Resonanzfrequenzen deutlich höher als



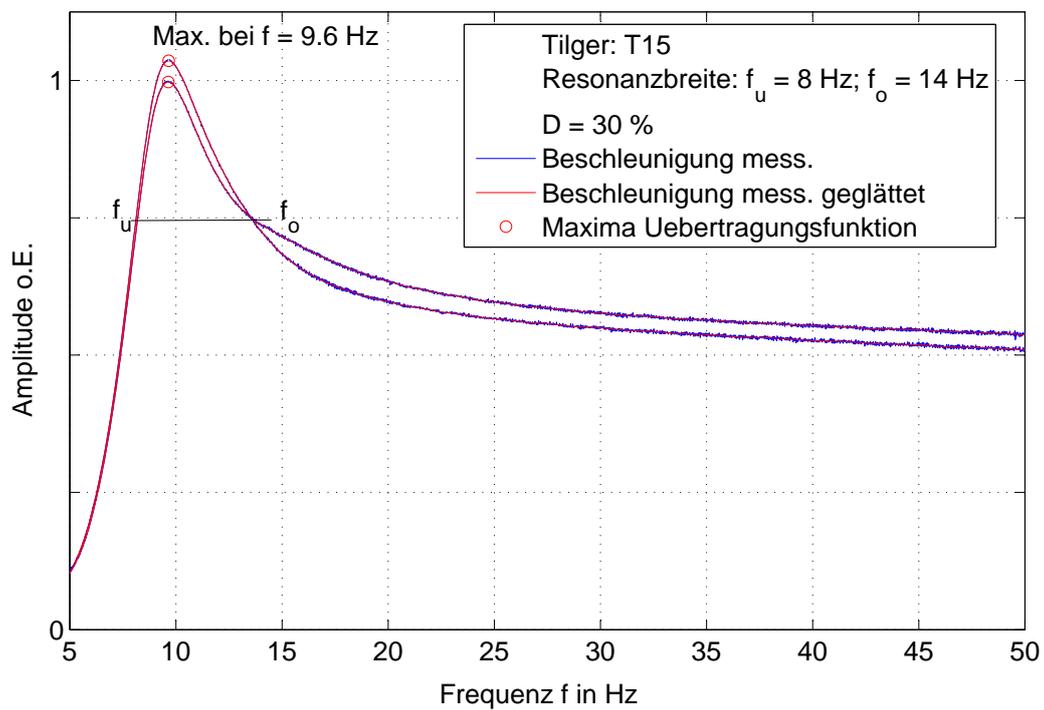
**Abbildung 5.7:** Tilgerprüfstand in steifem Stahlrahmen. Links im Bild ist die Messhardware bestehend aus zwei Vorverstärkern und einer Soundkarte sowie einem Verstärker für das Tilgersignal zu sehen.

die berechneten Werte. Die folgenden 30 Tilger werden aus einer neuen Charge Sylomer gefertigt, deren Steifigkeit deutlich näher an der in den Produktdatenblättern angegebenen liegt. Dadurch wird die Abweichung hier entsprechend geringer.

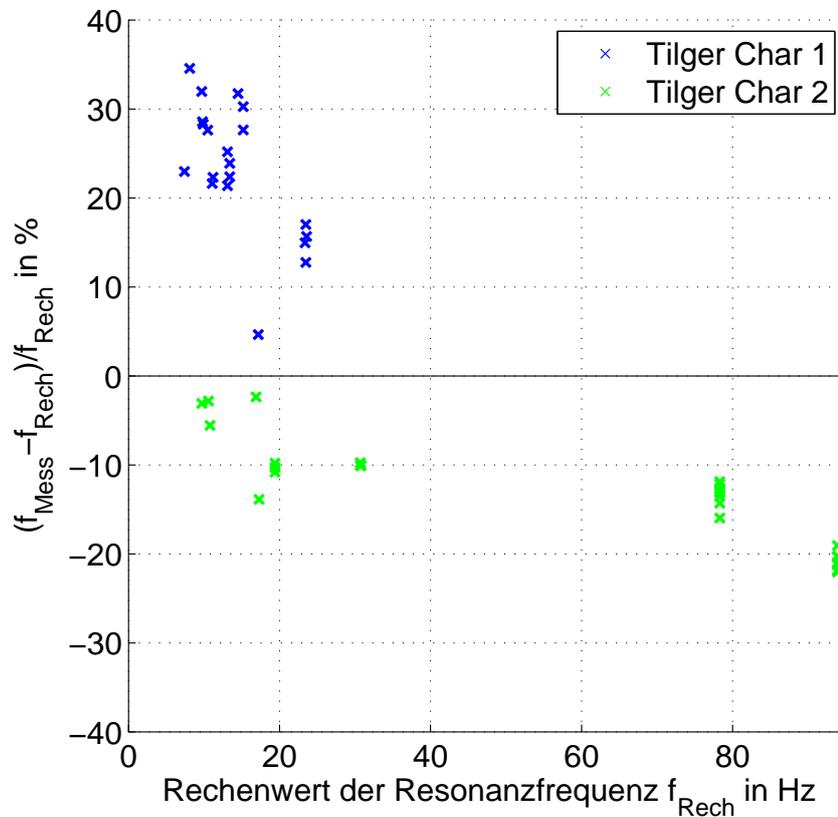
### 5.3.3 Einfluss von störenden Gegenständen auf der Standfläche

In [9] wird bereits auf eine Verschiebung der Resonanzfrequenz durch unterschiedliche verwendete Klebstoffe zwischen Sylomer und Tilgermasse hingewiesen. Es wird empfohlen, zur Verbindung ein doppelseitiges Klebeband zu verwenden und auf eine beidseitig ebene Klebefläche zu achten. Eine Klebung mit Heißkleber hatte z.B. eine deutliche Verstimmung aufgrund der Verformungen des Sylomeres durch die Heißkleberstränge zur Folge.

Aus diesem Grunde wird mit dem Prüfstand die Auswirkung von unterschiedlichen Störungen in der Standfläche des Tilgers untersucht. Dazu wird unter zwei der vier Elastomere jeweils ein kleiner Gegenstand gelegt und die Messung der Eigenfrequenz wiederholt. Die Gegenstände sind kleine Steine, Holzsplitter und Karosseriescheiben (s. Abb. 5.10). Die Messungen zeigen, dass bei Verwendung von Sylomeren mit einer Stärke von  $25\text{ mm}$  und  $50\text{ mm}$  der Einfluss der



**Abbildung 5.8:** Beispiel für ein Messergebnis aus dem Tilgerprüfstand. Abgebildet ist die Beschleunigung, referenziert auf die Spannung des anregenden Gleitsinus. Das Maximum wird auf 1 normiert. Ausgegeben wird die Frequenz des Maximums und die Dämpfung, berechnet aus der Halbwertsbreite (s. Kapitel 3.3.1)



**Abbildung 5.9:** Abweichungen der gemessenen Resonanzfrequenzen  $f_{\text{Mess}}$  von 50 gebauten Tilgern von den in *freqcalc* berechneten Sollwerten der Resonanzfrequenzen  $f_{\text{Rech}}$  in Prozent. Aufteilung in erste (Char 1) und zweite (Char 2) Materialcharge.



**Abbildung 5.10:** Gegenstände, deren Einfluss als Störung der Standfläche untersucht wird.

**Tabelle 5.2:** Resonanzfrequenzen der Tilger bei unterschiedlichen Störungen der Standfläche

| Tilger                | T1     | T2      | T3      | T4      |
|-----------------------|--------|---------|---------|---------|
| Stärke Sylomerlager   | 50 mm  | 25 mm   | 6 mm    | 3 mm    |
| ohne Störung          | 9.9 Hz | 29.8 Hz | 68.4 Hz | 74 Hz   |
| mit Stein             | 10 Hz  | 29.9 Hz | 64.3 Hz | 65.2 Hz |
| mit Holz              | 9.9 Hz | 29.5 Hz | 69.8 Hz | 60.5 Hz |
| mit Karosseriescheibe | 9.9 Hz | 29.4 Hz | 63.0 Hz | 50.6 Hz |
| maximale Abweichung   | 1.0 %  | 1.3 %   | 7.9 %   | 31.6 %  |

**Tabelle 5.3:** Resonanzfrequenzen eines Tilgers bei Variation der Anregung

| Amplitude Tilger<br>in $m/s^2$ | Resonanzfrequenz<br>in Hz |
|--------------------------------|---------------------------|
| 0.02                           | 9.48                      |
| 0.06                           | 9.46                      |
| 0.18                           | 9.40                      |

Störungen gering ist. Bei Tilgern mit einer Abstimmfrequenz im Bereich über 50 Hz wird auch Sylomer mit einer Stärke von 6 mm und 12 mm verwendet. Hier zeigen sich deutliche Abweichungen der Resonanzfrequenzen durch die Unebenheiten. In Tabelle 5.2 sind die Ergebnisse der Messungen zusammengefasst. Frequenzabhängige Darstellungen finden sich in [25]. Die Messungen zeigen deutlich, dass beim Einsatz von dünnen Elastomeren als Masse-Feder-Elemente besonders auf eine ebene und saubere Standfläche zu achten ist. So werden die entsprechenden Tilger für die hier durchgeführten Versuche auf Gehwegplatten gestellt, welche eine ebene Oberfläche aufweisen. Bei der Aufstellung von Tilgern mit dickeren Sylomerlagern wird auf eine saubere und ebene Standfläche geachtet.

### 5.3.4 Amplitudenabhängigkeit des Sylomers

In den Sylomer-Datenblättern der Firma Getzner sowie in einem Forschungsprojekt der TU München wird von einer Amplitudenabhängigkeit des Sylomers berichtet [40]. Um die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Amplitude zu überprüfen, wird die Stärke der Anregung mit dem Schwingerreger variiert, um eine mögliche Verstimmung der Eigenfrequenz ausschließen zu können. Die Ergebnisse (Tabelle 5.3) zeigen, dass die Eigenfrequenz der Tilger bei steigender Amplitude leicht sinkt. Diese Veränderung ist jedoch so gering, dass sie im Hinblick auf die Wirksamkeit der Tilger keine Rolle spielt.



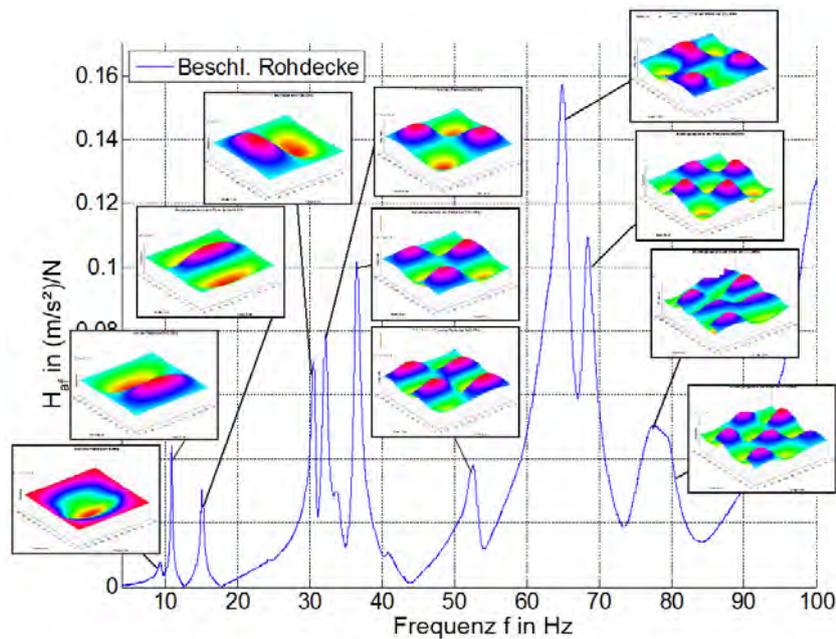
**Abbildung 5.11:** Brettsperrholz-Decke aus Leno105 mit Tilgern bestückt.

### 5.3.5 Dauerstandfestigkeit Sylomer

In [25] wird eine Untersuchung zum Zeitverhalten der Tilger innerhalb von 22 Tagen gemacht. Diese zeigt, dass sich die Resonanzfrequenz verschiedener Tilger zu höheren Werten verschiebt. Die Verschiebungen der Tilgerfrequenz innerhalb dieser Zeit betragen bei fünf verschiedenen Tilgertypen jeweils ca. 8%. Untersuchungen zum Standverhalten der Tilger in längeren Zeiträumen werden nicht durchgeführt. Nach Angaben des Herstellers [19] ist bei dem Material bei einer Belastung innerhalb des vorgegebenen Einsatzbereiches keine Verstimmung über die Zeit zu erwarten.

## 5.4 Tilger auf Brettsperrholz-Rohdecke

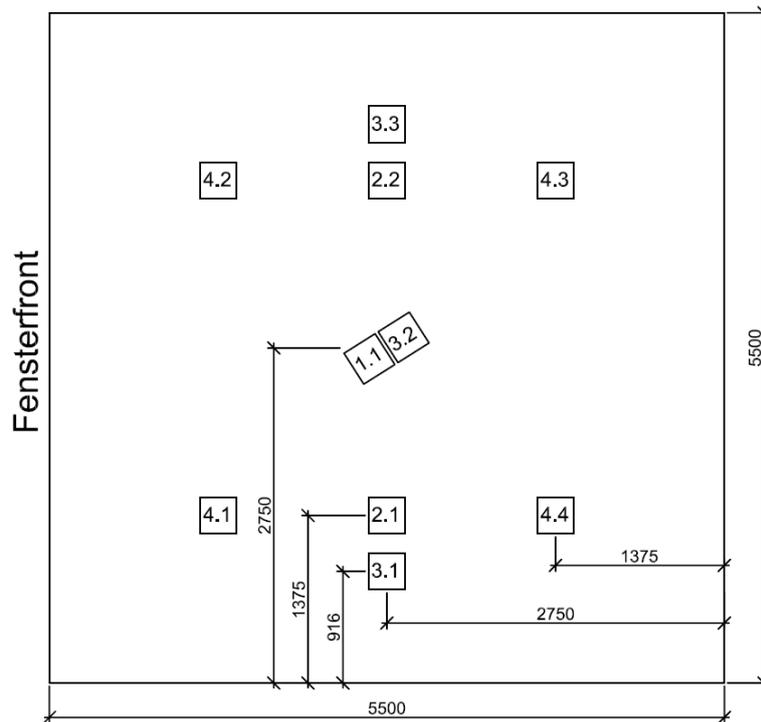
Untersuchungen mit Tilgern werden im Deckenprüfstand an der Decke aus Leno105 (s. Kap. 2.1.1) durchgeführt. Dabei wird zunächst eine vierseitig aufgelagerte Rohdecke mit Tilgern versehen. Ein weiterer Versuch wird an einer zweiseitig aufgelagerten Decke mit Unterdecke durchgeführt. Hier wird auch die Anzahl der eingesetzten Tilger variiert. Abb. 5.11 zeigt die Rohdecke aus Leno105 bestückt mit den hier untersuchten Schwingungstilgern für die Rohdecke.



**Abbildung 5.12:** Ergebnisse der in Kap. 4.1.2 beschriebenen Messungen an der Rohdecke aus Leno105. Dargestellt ist die Eingangsspektroskopie und die Schwingformen bei den Resonanzfrequenzen.

### 5.4.1 Tilger auf vierseitig aufgelagerter Rohdecke

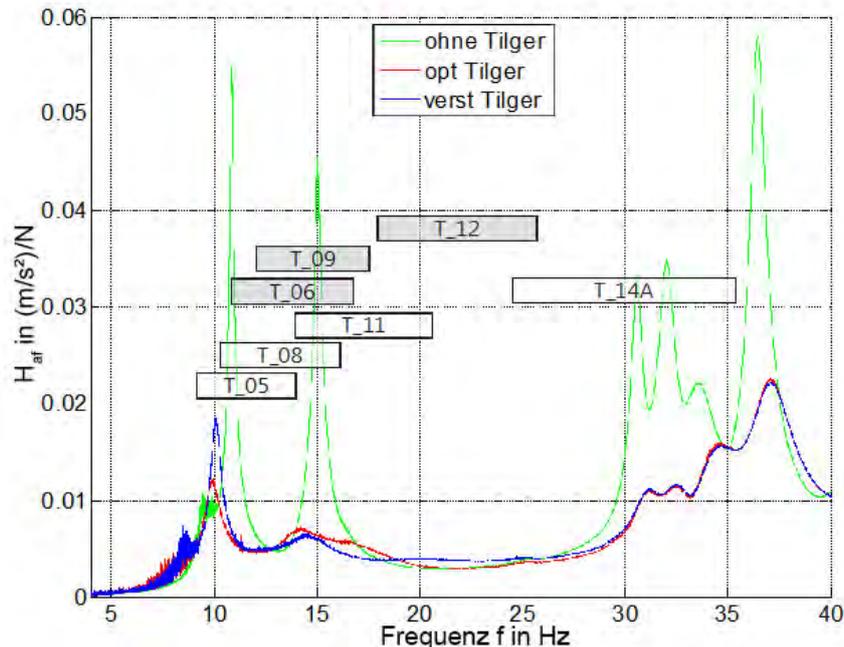
Zur Auslegung der Tilger werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Messung an der Rohdecke herangezogen (s. Abb. 5.12). Zunächst werden Tilger für die ersten vier Eigenmoden konstruiert. Diese liegen bei  $9.4\text{ Hz}$ ,  $10.9\text{ Hz}$ ,  $15.1\text{ Hz}$  und  $30.6\text{ Hz}$ . Die Positionierung der Tilger erfolgt jeweils im Bereich der maximalen Schwingungsauslenkung (Schwingungsbauch) der jeweiligen Schwingungsmoden (s. Abb. 5.13). Die Bezeichnung der Tilger ist Tabelle 5.4 zu entnehmen.



**Abbildung 5.13:** Positionen der einzelnen Tilger auf der Rohdecke aus Leno105. Die erste Zahl der Bezeichnung der Tilger bezieht sich auf die Schwingungsmode.

**Tabelle 5.4:** Tilgerbezeichnungen, berechnete Frequenz  $f_{Rech}$  und gemessene Resonanzfrequenzen  $f_{Mess}$  für die Tilger der Leno105 Rohdecke

| Pos. Nr. |           | Tilger Nr. | $f_{Rech}$ | $f_{Mess}$ |
|----------|-----------|------------|------------|------------|
| 1.1      |           | $T_{05}$   | $9.4Hz$    | $10.9Hz$   |
| 1.1      | verstimmt | $T_{06}$   | $9.4Hz$    | $12.8Hz$   |
| 2.1      |           | $T_{08a}$  | $10.9Hz$   | $12.6Hz$   |
| 2.2      |           | $T_{08b}$  | $10.9Hz$   | $12.7Hz$   |
| 2.1      | verstimmt | $T_{09a}$  | $10.9Hz$   | $13.7Hz$   |
| 2.2      | verstimmt | $T_{09b}$  | $10.9Hz$   | $13.5Hz$   |
| 3.1      |           | $T_{11a}$  | $15.1Hz$   | $15.9Hz$   |
| 3.2      |           | $T_{11b}$  | $15.1Hz$   | $16.6Hz$   |
| 3.3      |           | $T_{11c}$  | $15.1Hz$   | $16.4Hz$   |
| 3.1      | verstimmt | $T_{12a}$  | $15.1Hz$   | $19.8Hz$   |
| 3.2      | verstimmt | $T_{12b}$  | $15.1Hz$   | $19.1Hz$   |
| 3.3      | verstimmt | $T_{12c}$  | $15.1Hz$   | $19.4Hz$   |
| 4.1      |           | $T_{14a}$  | $24.1Hz$   | $27.5Hz$   |
| 4.2      |           | $T_{14b}$  | $24.1Hz$   | $26.5Hz$   |
| 4.3      |           | $T_{14c}$  | $24.1Hz$   | $26.9Hz$   |
| 4.4      |           | $T_{14d}$  | $24.1Hz$   | $27.3Hz$   |



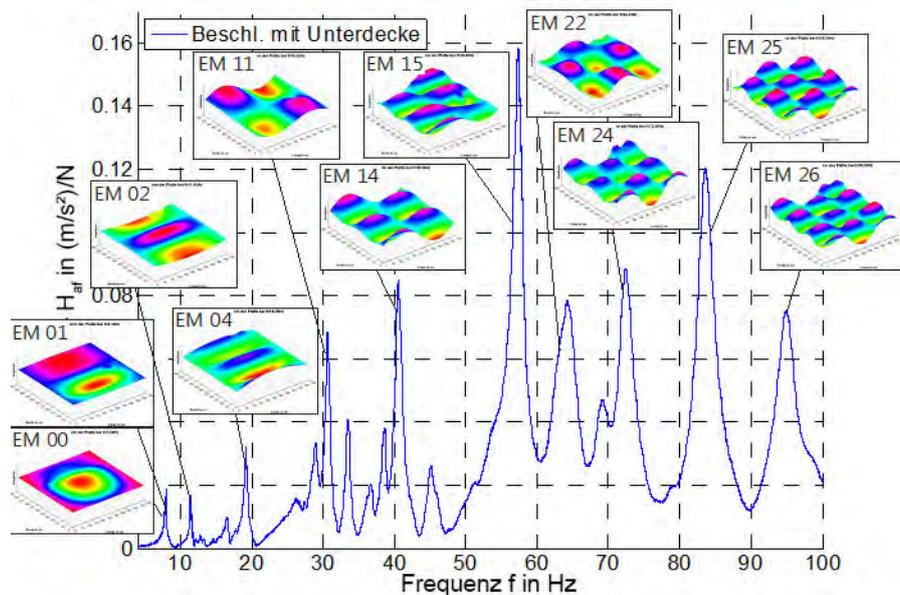
**Abbildung 5.14:** Vergleich der Eingangszakzeleranz der vierseitig aufgelagerten Decke aus Leno105 mit und ohne Tilger und mit zu hoch abgestimmten Tilgern. Die Resonanzbreiten der Tilger sind durch die Rechtecke markiert. Weiße Rechtecke: abgestimmte Tilger, graue Rechtecke: nach oben verstimmte Tilger.

Bei den Tilgern handelt es sich um die in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Tilger, welche aus der relativ steifen Charge Sylomer SR11 gebaut wurden. In Abbildung 5.9 sind diese in grün dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Tilger die Amplituden der Moden deutlich reduzieren (s. Abb. 5.14). Um die Wirksamkeit von zu hoch abgestimmten Tilgern zu überprüfen, werden in einem weiteren Schritt die Tilgerresonanzen der Tilger T\_05, T\_08 und T\_11 durch Reduktion der Masse zu höheren Resonanzfrequenzen verschoben und erneut eine Messung mit Tilgern an den selben Positionen durchgeführt. In Abb. 5.14 zeigt sich lediglich im Bereich der ersten Mode eine Erhöhung der Amplitude, alle höher gelegenen Moden werden auch durch die höher abgestimmten Tilger in ihrer Amplitude stark reduziert.

## 5.4.2 Tilger auf Brettsperrholz-Decke mit Unterdecke

Weitere Versuche mit Tilgern werden an der zweiseitig aufgelagerten Decke aus Leno105 mit montierter Unterdecke durchgeführt. Wie in Kapitel 4.1.3 zu sehen ist, wird die Modendichte

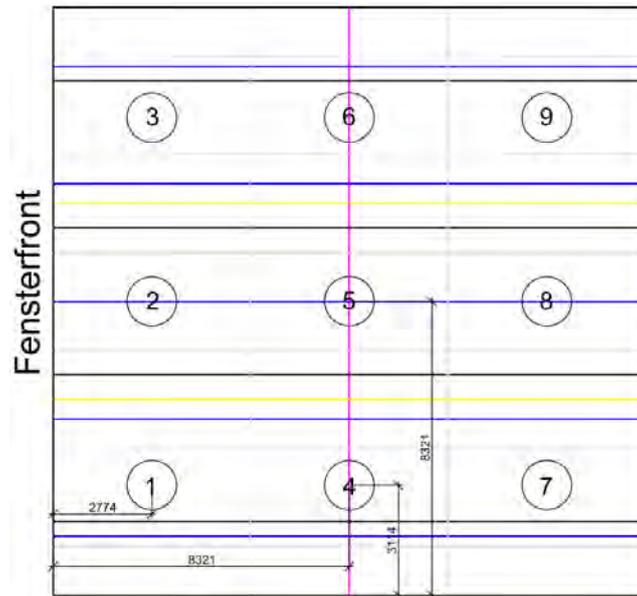


**Abbildung 5.15:** Schwingformen der Decke aus Leno105 mit montierter Unterdecke.

hier im Vergleich zur vierseitig aufgelagerten Rohdecke deutlich größer. Gleichzeitig verschieben sich die Resonanzfrequenzen durch die von der Unterdecke verursachte Massenerhöhung zu tieferen Werten. In Abb. 5.15 ist die Eingangsakzeleranz dieser Kombination mit den dazugehörigen Schwingformen zu sehen. Da vor allem im Bereich oberhalb von ca.  $35 \text{ Hz}$  nicht für jede Schwingform Tilger aufgestellt werden können, wird versucht, Tilger mit einer sehr hohen Dämpfung und daraus resultierend einer Wirkungsbreite von ca.  $40 \text{ Hz}$  bis ca.  $100 \text{ Hz}$  zu konstruieren. Um Tilger in diesem Frequenzbereich zu konstruieren wird Sylomer SR11 in sehr dünner Ausführung benötigt. Dies wird hier durch Aufspalten von dickeren Platten auf  $6 \text{ mm}$  hergestellt. Da das Material nicht für diesen Frequenzbereich ausgelegt ist, bzw. die entsprechenden Materialparameter nicht bekannt sind, lässt sich nur eine sehr grobe Vordimensionierung vornehmen. Aus diesem Grunde müssen die Tilger zunächst gebaut und später durch Anpassen der Sylomerabmessungen weiter optimiert werden.

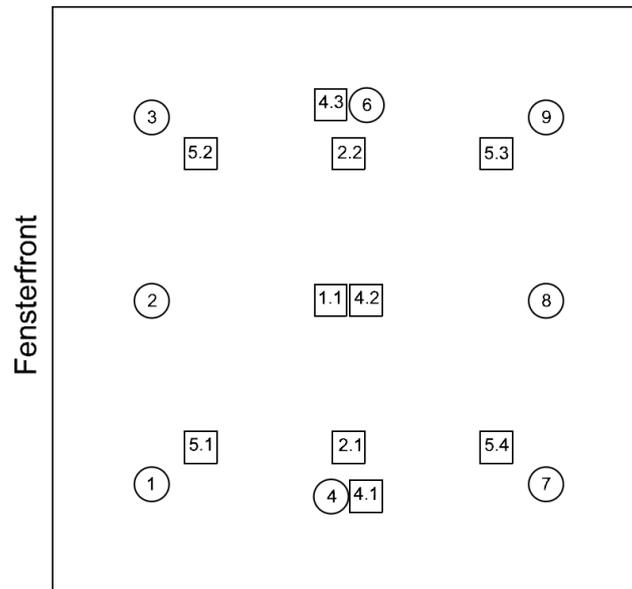
Messungen dieser Tilger im Tilgerprüfstand zeigen eine Halbwertsbreite von ca.  $40 \text{ Hz}$  bei einer Resonanzfrequenz von ca.  $65 \text{ Hz}$  für diese Konstruktion. Es werden zunächst auch Tilger mit einer Sylomerdicke von  $3 \text{ mm}$  untersucht. Diese Variante wird aber auf Grund von noch größeren Ungenauigkeiten und einer größeren Empfindlichkeit bei Störungen der Standfläche (s. Kap. 5.3.3) nicht weiter verfolgt.

Um Positionen für diese Tilger zu finden, welche es ermöglichen, möglichst viele Schwingungsmoden zu tilgen, werden die Knotenlinien der Eigenformen im Bereich zwischen  $40 \text{ Hz}$  und



**Abbildung 5.16:** Verteilung der Knotenlinien im Bereich zwischen  $40 \text{ Hz}$  und  $100 \text{ Hz}$  und daraus folgende Positionierung der Tilger für diesen Frequenzbereich.

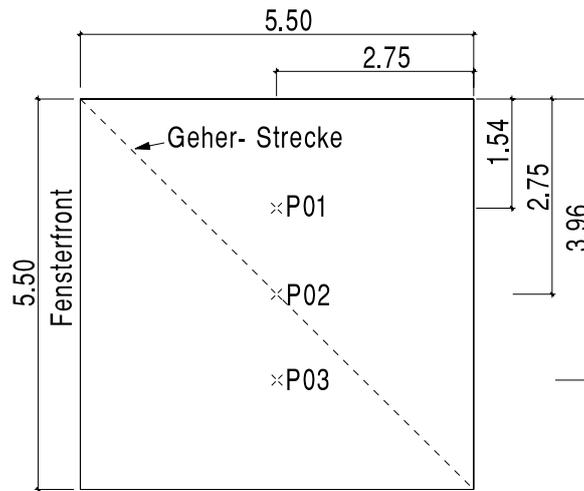
$100 \text{ Hz}$  überlagert und Positionen gesucht, welche möglichst nicht auf Knotenlinien der Moden zu liegen kommen (s. Abb. 5.16). Die Positionierung aller Tilger ist in Abb. 5.17 zu sehen. Die in *freqcalc* [18] berechneten Auslegungsfrequenzen und die gemessenen Resonanzfrequenzen der Tilger sind in Tabelle 5.5 aufgeführt.



**Abbildung 5.17:** Verteilung der Tilger auf der Decke aus Leno105 mit abgehängter Unterdecke.

**Tabelle 5.5:** Tilgerbezeichnungen, Auslegungsfrequenzen nach freqcalc  $f_{Rech}$  und gemessene Resonanzfrequenzen  $f_{Mess}$  für die Tilger der Leno105 Rohdecke mit abgehängter Unterdecke

| Pos. Nr. | Tilger Nr. | $f_{Rech}$ | $f_{Mess}$ |
|----------|------------|------------|------------|
| 1.1      | $T_{15}$   | $9.7Hz$    | $9.4Hz$    |
| 2.1      | $T_{16a}$  | $10.8Hz$   | $10.2Hz$   |
| 2.2      | $T_{16b}$  | $10.6Hz$   | $10.3Hz$   |
| 4.1      | $T_{18a}$  | $19.4Hz$   | $17.3Hz$   |
| 4.2      | $T_{18b}$  | $19.4Hz$   | $17.4Hz$   |
| 4.3      | $T_{18c}$  | $19.4Hz$   | $17.5Hz$   |
| 5.1      | $T_{19a}$  | $30.7Hz$   | $27.6Hz$   |
| 5.2      | $T_{19b}$  | $30.7Hz$   | $27.7Hz$   |
| 5.3      | $T_{19c}$  | $30.7Hz$   | $27.7Hz$   |
| 5.4      | $T_{19d}$  | $30.7Hz$   | $27.7Hz$   |
| 1        | $6mmT1$    | $78Hz$     | $67Hz$     |
| 2        | $6mmT2$    | $78Hz$     | $68Hz$     |
| 3        | $6mmT3$    | $78Hz$     | $68Hz$     |
| 4        | $6mmT4$    | $78Hz$     | $68Hz$     |
| 5        | $6mmT5$    | $78Hz$     | $69Hz$     |
| 6        | $6mmT6$    | $78Hz$     | $68Hz$     |
| 7        | $6mmT7$    | $78Hz$     | $68Hz$     |
| 8        | $6mmT8$    | $78Hz$     | $69Hz$     |
| 9        | $6mmT9$    | $78Hz$     | $66Hz$     |



**Abbildung 5.18:** Messpositionen und Geherweg für die Messung der  $KB_{Fmax}$ -Werte auf der Rohdecke bei Anregung durch einen Geher.

Eine Messung in der beschriebenen Konfiguration mit insgesamt 20 Tilgern auf der Decke zeigt eine deutliche Reduktion der Amplituden im gesamten Frequenzbereich unterhalb von  $100\text{ Hz}$  (s. Abb. 5.19).

In einem weiteren Versuch wird die Anregung der Decke durch einen Geher untersucht. Dabei wird die Decke mehrfach diagonal überschritten und die dadurch verursachten Beschleunigungen aufgezeichnet. Die Messpositionen und die begangene Strecke werden in Abb. 5.18 dargestellt. Aus den Messwerten werden die maximalen bewerteten Schwingstärken  $KB_{Fmax}$  gemäß DIN 4150-2 [1] (s. Kap. 7.4.2) berechnet. Ein Vergleich der  $KB_{Fmax}$ -Werte bei Begehung der Decke mit und ohne Tilger findet sich in Tabelle 5.6.

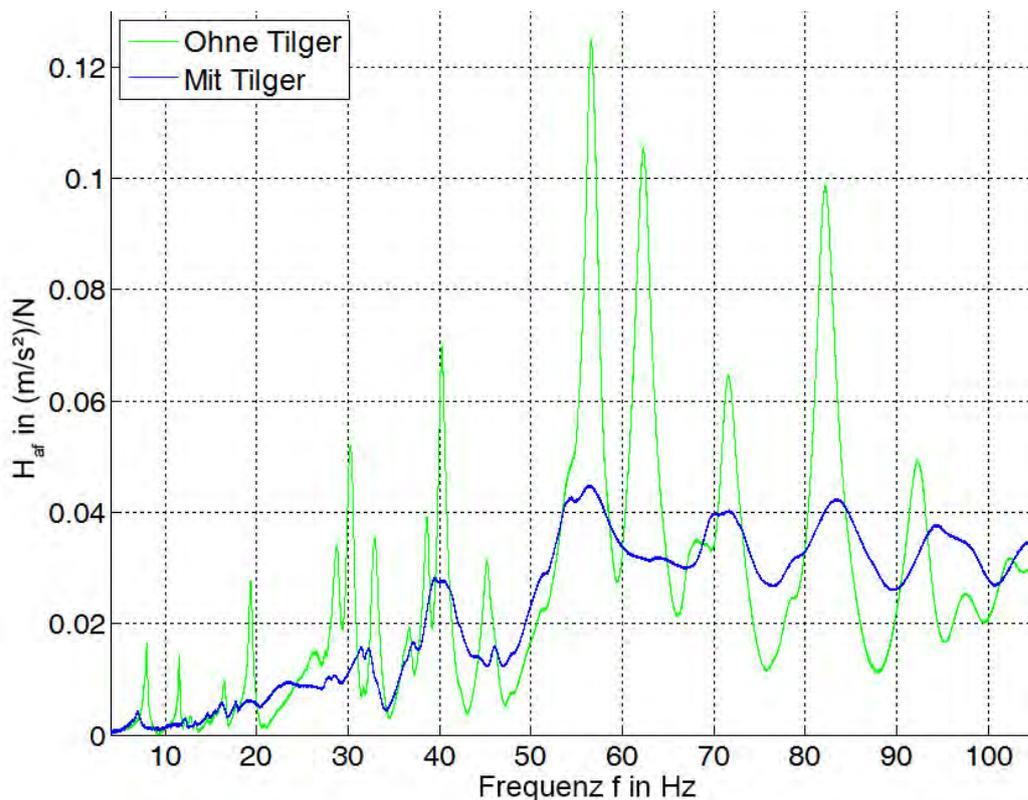
**Tabelle 5.6:** Vergleich der  $KB_{Fmax}$ -Werte gemessen auf der Decke mit und ohne Tilgern bei Anregung der Decke durch einen Geher.

| Messposition | $KB_{Fmax}$ ohne Tilger | $KB_{Fmax}$ mit Tilger |
|--------------|-------------------------|------------------------|
| P01          | 7.8                     | 4.2                    |
| P02          | 10.3                    | 5.0                    |
| P03          | 9.8                     | 2.6                    |

Die gemessenen Werte für  $KB_{Fmax}$  liegen weit über den empfohlenen Grenzwerten. Dies ist durch die Messung direkt auf der Rohdecke zu erklären.

Es zeigt sich jedoch, dass sich die Werte für  $KB_{Fmax}$  bei der Anregung durch einen Geher durch den Einsatz von Tilgern auf der Rohdecke um ca. 50% reduzieren lassen.

Um zu prüfen, ob sich die Reduzierung der Beschleunigungen der Rohdecke auch auf die

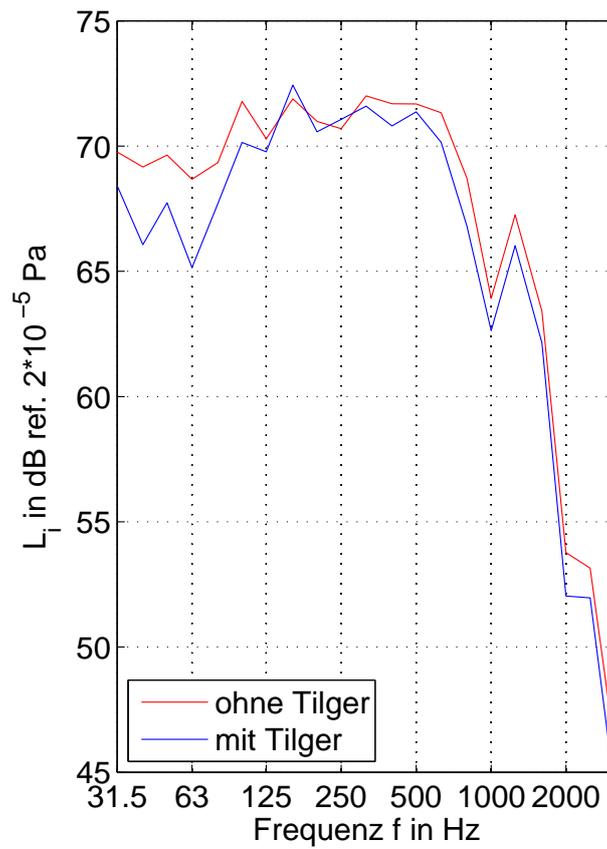


**Abbildung 5.19:** Vergleich der Eingangszakzeleranz der Leno105 Decke mit abgehängter Unterdecke mit und ohne Tilger.

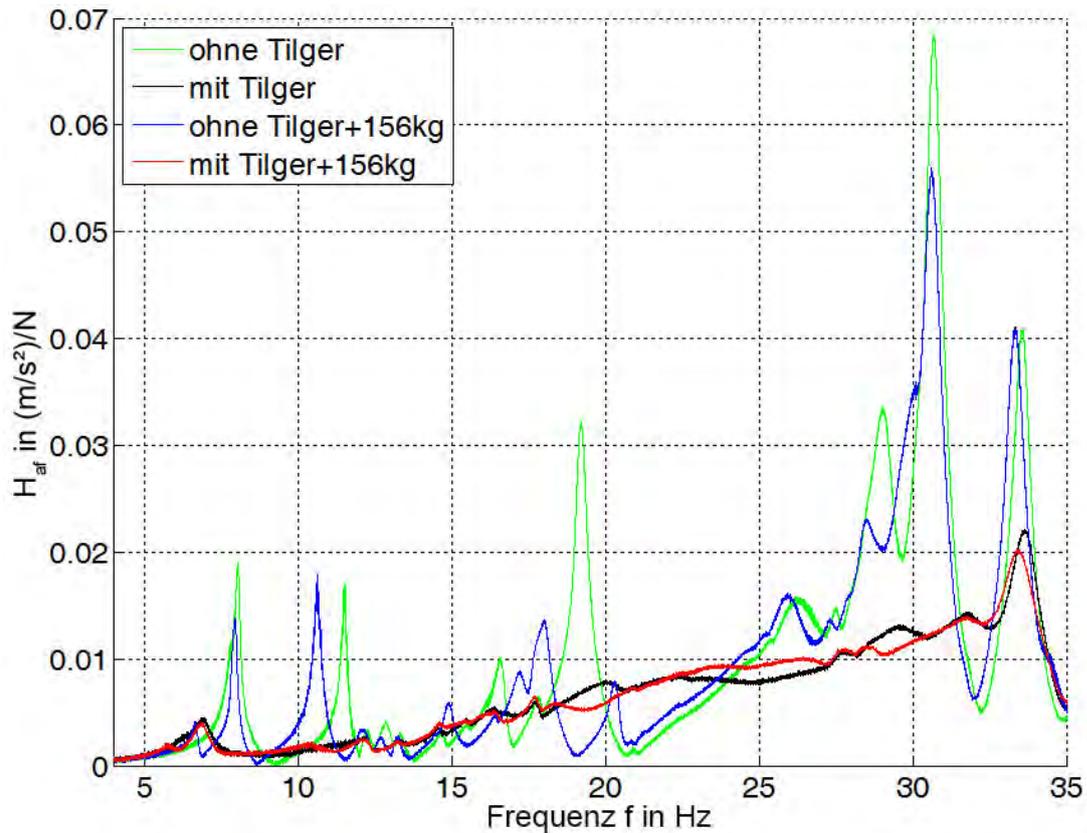
Schallübertragung über die abgehängte Unterdecke in den Empfangsraum auswirkt, werden die Schalldruckpegel im Empfangsraum mit und ohne Tilger auf der Rohdecke bei Anregung mittels eines Normhammerwerks gemessen. Das Hammerwerk wird an insgesamt vier Positionen aufgestellt. Im Empfangsraum wird an sechs Mikrofonpositionen der Schalldruckpegel gemessen und über alle Messungen gemittelt. Die Ergebnisse in Abb. 5.20 zeigen, dass sich die Reduktion der Beschleunigungspegel auf der Rohdecke von etwa 50 % ( $\hat{=} 6$  dB) in einer Reduktion der Schalldruckpegel im Empfangsraum von ca. 3 dB auswirkt. Weitere Versuche zur Reduzierung der abgestrahlten Schalleistung durch Schwingungstilger in der Unterdeckenkonstruktion werden in Kapitel 5.5 beschrieben.

### 5.4.3 Wirkung von Tilgern bei zusätzlicher Masse auf Decke

Um den Einfluss zusätzlicher Verkehrslasten auf der Decke auf die Wirkung der Tilger zu untersuchen, wird eine Masse von 156 kg in Deckenmitte positioniert. Wie zu erwarten werden die

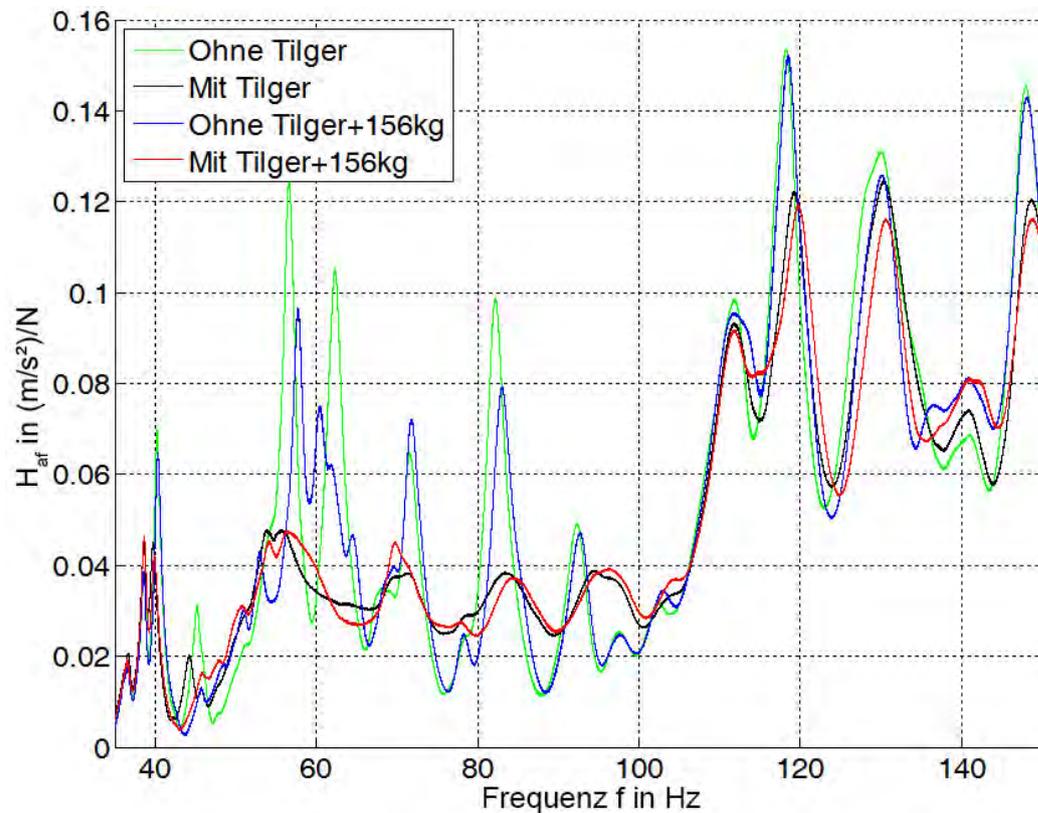


**Abbildung 5.20:** Vergleich der Trittschallpegel  $L_i$  bei Hammerwerksanregung auf der Rohdecke mit und ohne Tilger. Decke aus Leno105 mit Unterdecke.



**Abbildung 5.21:** Vergleich der Eingangszakzelerenzen der Decke aus Leno105 mit Unterdecke mit und ohne Zusatzgewicht im Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 40 Hz jeweils mit und ohne Tilger. Die Wirkung der Tilger wird durch das Zusatzgewicht kaum beeinflusst.

Resonanzfrequenzen der Decke durch das Zusatzgewicht verschoben. Die Wirkung der Tilger wird durch das Zusatzgewicht jedoch kaum beeinflusst (s. Abb. 5.21 und 5.22).

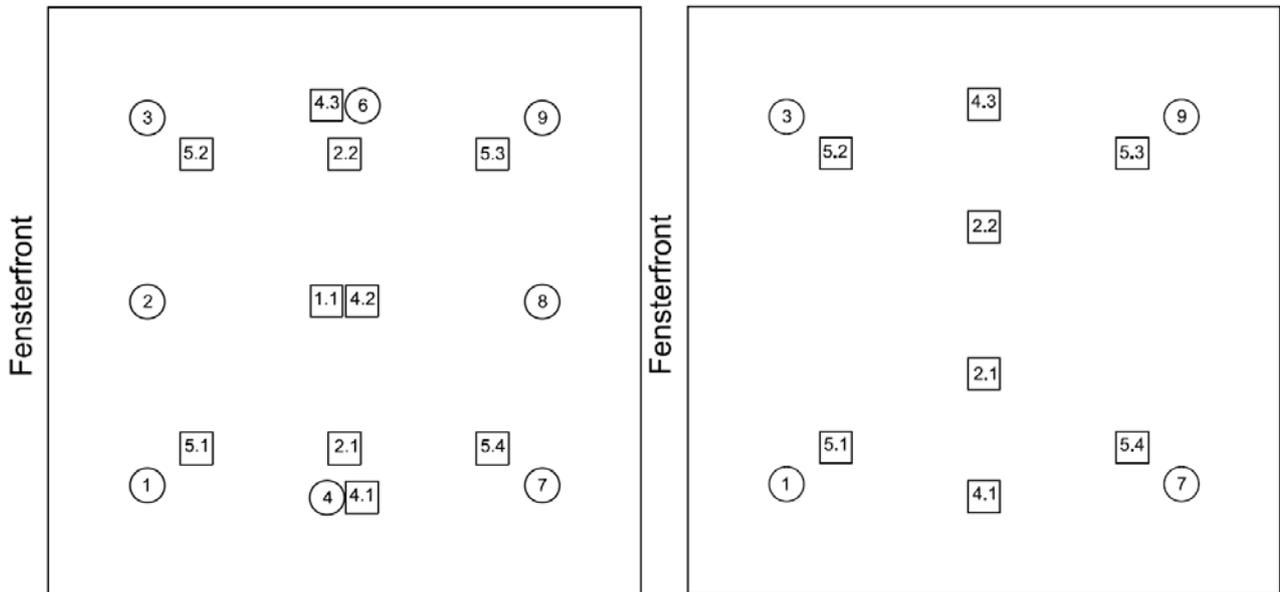


**Abbildung 5.22:** Vergleich der Eingangszkeleranzen der Decke aus Leno105 mit Unterdecke mit und ohne Zusatzgewicht im Frequenzbereich zwischen 35 Hz und 140 Hz jeweils mit und ohne Tilger. Die Wirkung der Tilger wird durch das Zusatzgewicht kaum beeinflusst.

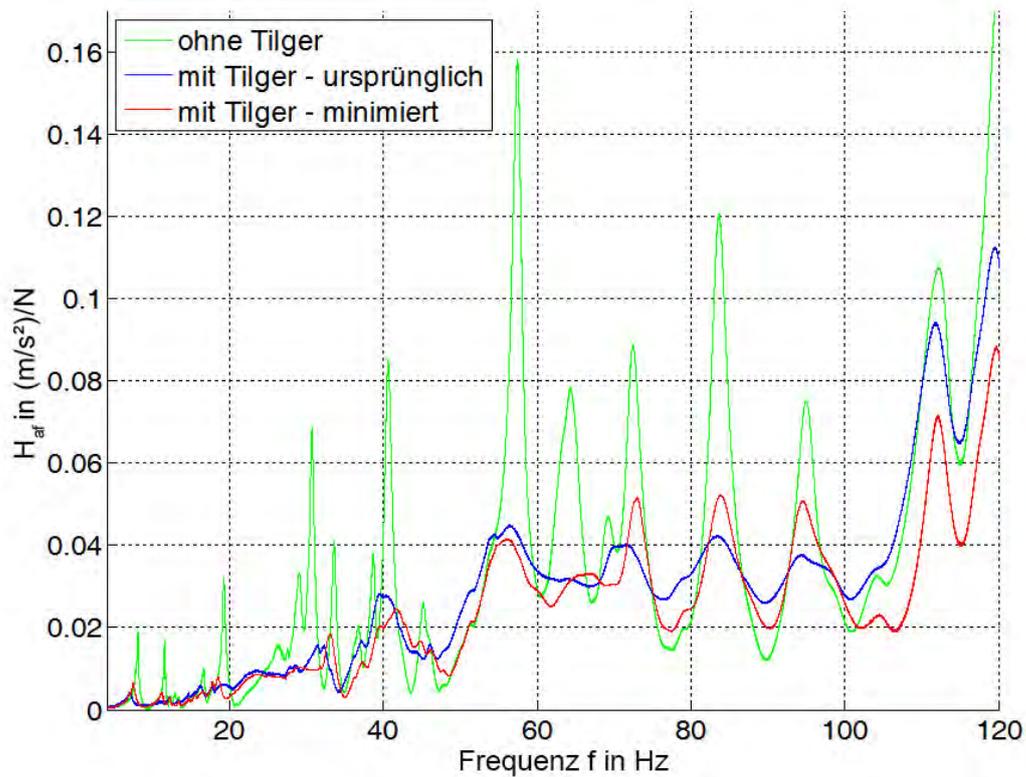
#### 5.4.4 Reduzierung der Tilgeranzahl

Im vorhergehenden Abschnitt werden insgesamt 18 Tilger auf der Decke positioniert. Eine weitere Untersuchung soll zeigen, ob eine Reduktion der Anzahl der Tilger möglich ist, ohne deren Wirkung maßgeblich zu reduzieren.

Dazu wird die Tilgeranzahl wie in Abb. 5.23 dargestellt reduziert. Es entfallen vier von acht Tilgern für den Frequenzbereich von 50 Hz – 90 Hz. Der Tilger T1.1 ( $f_{Mess} = 9.4 \text{ Hz}$ ) für die erste Eigenmode wird entfernt, da die Tilger T2 ( $f_{Mess} = 10.2 \text{ Hz}$ ) dessen Frequenzbereich ebenfalls abdecken und die Tilger T4 ( $f_{Mess} = 17.4 \text{ Hz}$ ) werden um T4.2 auf zwei Stück reduziert. Abbildung 5.24 zeigt, dass die Wirkung der Tilger durch die Reduktion deren Anzahl kaum beeinflusst wird. Eine weitere Reduzierung der Tilgeranzahl wird nicht untersucht.



**Abbildung 5.23:** Vergleich der Tilgerpositionen vor (links) und nach (rechts) der Reduzierung der Tilgeranzahl auf der Decke



**Abbildung 5.24:** Vergleich der Messergebnisse mit 18 Tilgern und mit 12 Tilgern auf der Rohdecke.

### 5.4.5 Zusammenfassung

Die in Kapitel 5.4 beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass mit einer relativ geringen Anzahl an Tilgern die Schwingungen der Rohdecke im Frequenzbereich unter  $100\text{ Hz}$  deutlich reduziert werden können. Genauere Beschreibungen der Versuche sind in [25] zu finden.

Die Tilger reduzieren den abgestrahlten Trittschall in ihrem wirksamen Frequenzbereich um ca.  $3\text{ dB}$  pro Terzband. Eine Tilgung der Moden im Frequenzbereich über  $100\text{ Hz}$  ist bei dem untersuchten Deckensystem auf Grund der höheren Modendichte nicht mehr ratsam.

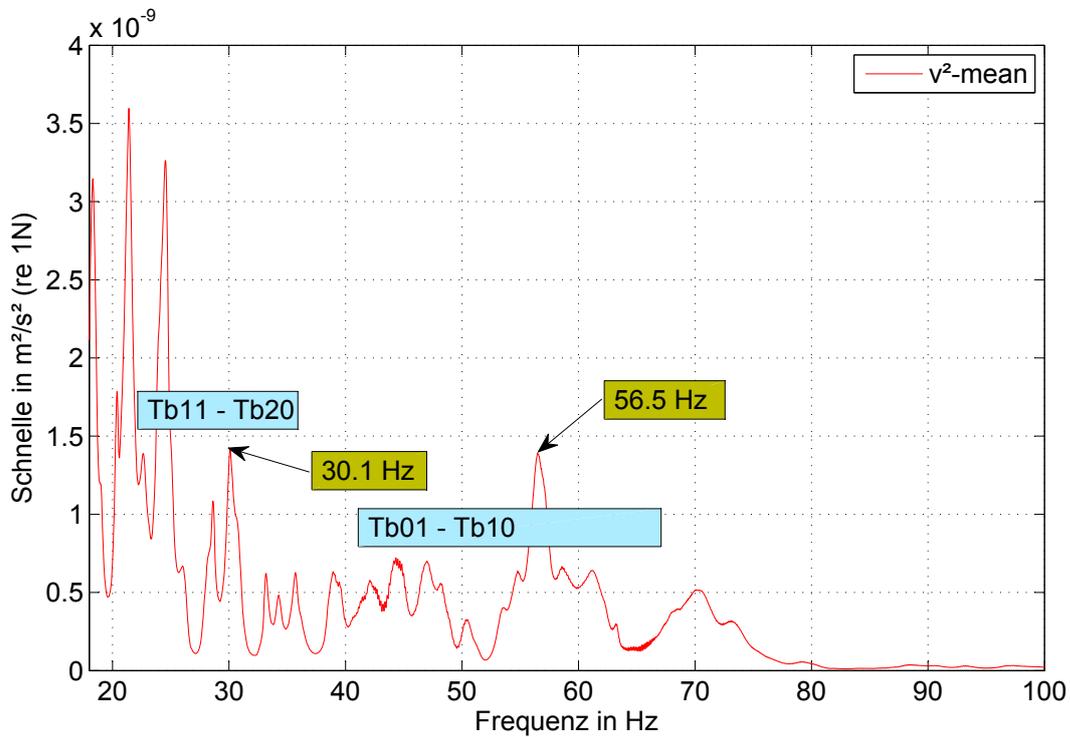
## 5.5 Tilger auf Unterdecke

Bei manchen Holzdeckensystemen ist die empfangsseitig abstrahlende Fläche die abgehängte Unterdecke. Im Rahmen einer Bachelorarbeit [54] wird untersucht, ob die Schallabstrahlung der abgehängten Unterdecke im Frequenzbereich unter  $100\text{ Hz}$  durch Schwingungstilger auf der Unterdecke reduziert werden kann. Dabei werden zwei verschiedene Tilgertypen direkt auf der Unterdecke platziert und die abgestrahlte Schallleistung bei Anregung mit dem Schwingerreger bzw. mit einem Normhammerwerk untersucht. Die Untersuchungen werden an der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Holzbalkendecke mit der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen abgehängten Unterdecke durchgeführt. Dazu wird zunächst messtechnisch das räumlich gemittelte Schnellequadrat  $\overline{v^2}$  auf der Oberfläche der abgehängten Decke messtechnisch bestimmt.

### 5.5.1 Tilger 01

Im ersten Versuch sollen zwei markante Resonanzen der Unterdecke bei  $30.1\text{ Hz}$  und  $56.6\text{ Hz}$  betilgt werden. Die optimalen Frequenzen für entsprechende Tilger ergeben sich aus Gleichung 5.5 zu  $49.1\text{ Hz}$  und zu  $26.2\text{ Hz}$ . Es werden für jede der beiden Frequenzen je 10 Tilger gebaut. Diese werden aus zwei Lagen MDF (mitteldichte Faserplatte) mit Abmessungen von  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  und einer Gesamtstärke von  $38\text{ mm}$  gefertigt. Die Masse eines einzelnen Tilgers beträgt  $2.6\text{ kg}$ . Zehn der Tilger werden mit einer Feder aus  $6\text{ mm}$  starkem Sylomer SR1 konstruiert und zehn aus  $12\text{ mm}$  starkem Sylomer SR11.

Eine Messung aller Tilger im Tilgerprüfstand ergibt mittlere Resonanzfrequenzen von  $50.2\text{ Hz}$  und  $27.2\text{ Hz}$  für die beiden Tilgertypen (Tabelle 5.7). Die Halbwertsbreiten betragen ca.  $12\text{ Hz}$  bzw.  $25\text{ Hz}$  und decken die Resonanzfrequenzen der Unterdecke ausreichen ab (s. Abb. 5.25).



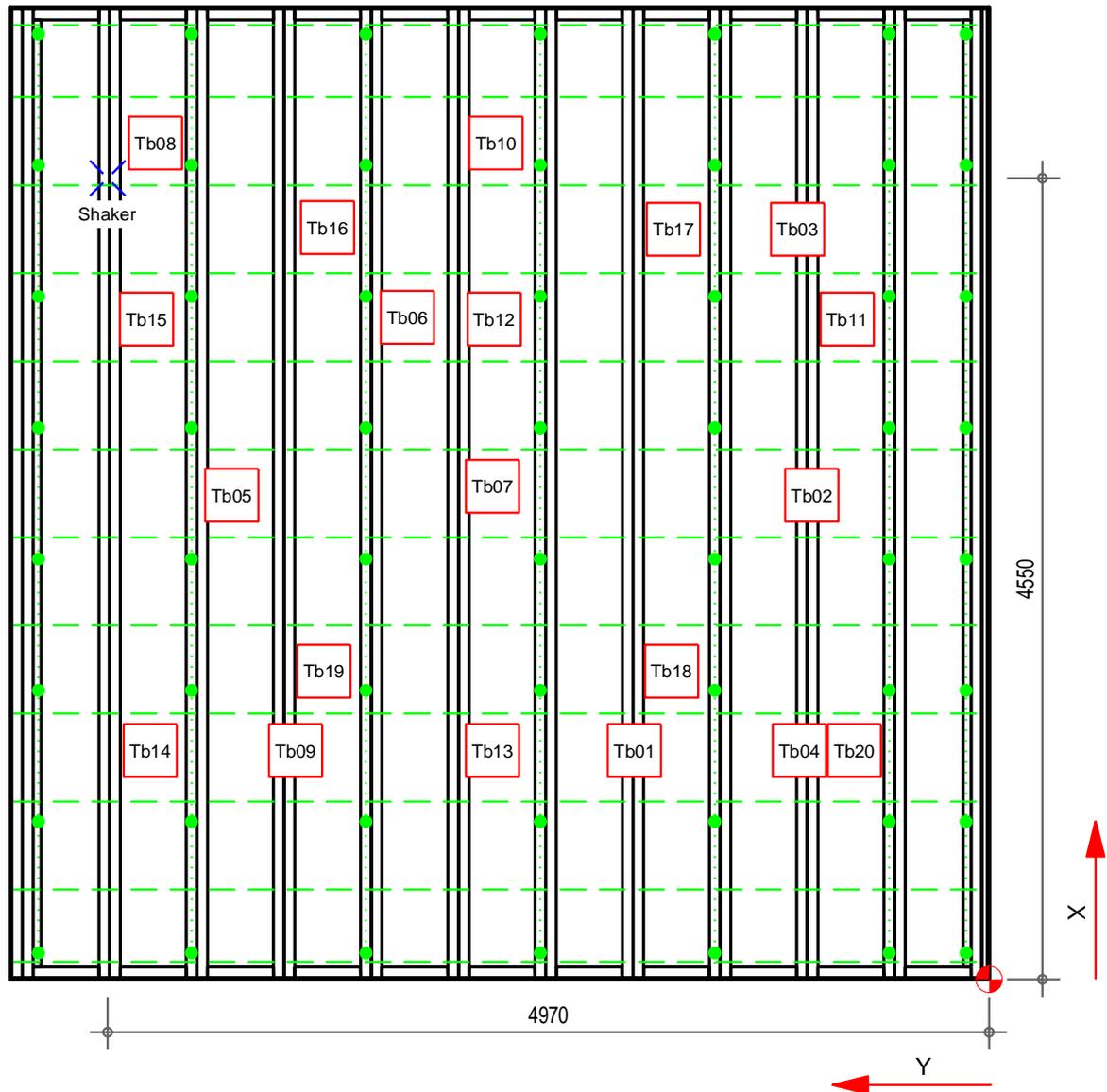
**Abbildung 5.25:** Spektrum der räumlich gemittelten, quadrierten Schnelle referenziert auf  $F_{Anregung}$  sowie die Halbwertsbreiten der zwei Tilgergruppen Tb01-Tb10 und Tb11-Tb20

**Tabelle 5.7:** Optimale Tilgerfrequenz  $f_{T,opt}$  sowie Mittelwerte  $f_0$  und Standardabweichung der Tilger Tb01-Tb20

| Typ         | $f_{T,opt}$ in Hz | Mittelwert $f_0$ in Hz | Standardabweichung in Hz |
|-------------|-------------------|------------------------|--------------------------|
| Tb01 - Tb10 | 49.1              | 50.2                   | $\pm 1.3$                |
| Tb11 - Tb20 | 26.2              | 27.2                   | $\pm 0.5$                |

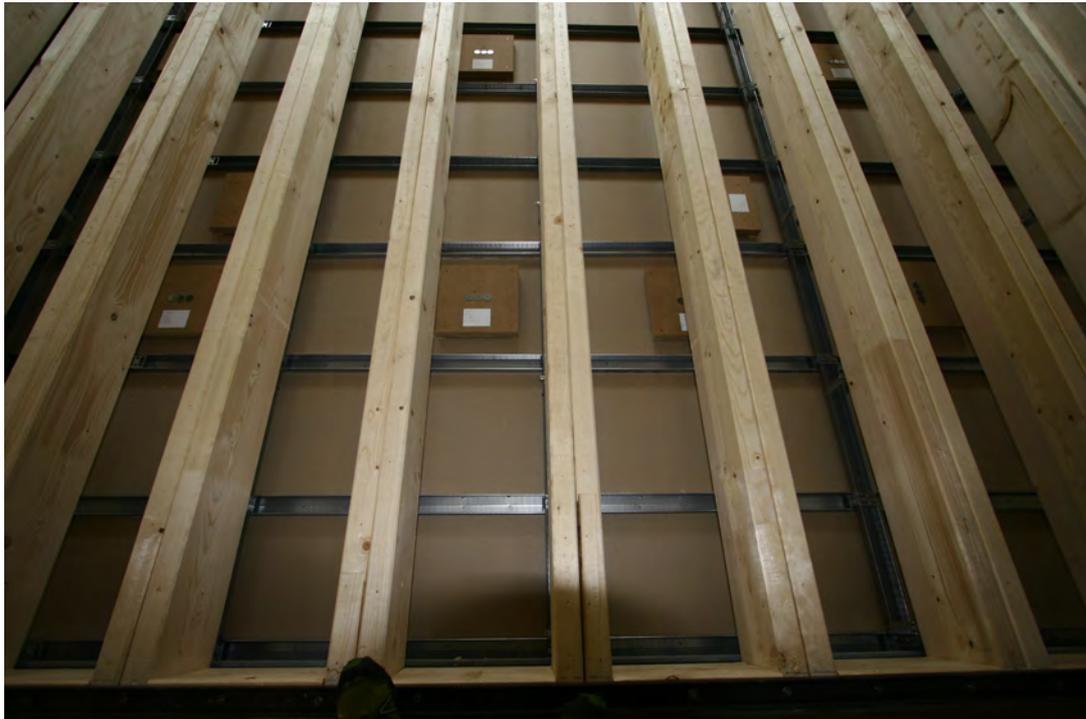
Die Tilger werden wie in Abb. 5.26 dargestellt auf der Unterdecke verteilt. Für den Einbau wird die OSB-Bekplankung der Decke vorübergehend entfernt. Dadurch können die Tilger von oben auf der Unterdecke positioniert werden (s. Abb. 5.27).

Fensterfront



- Tb... Tilger 01 30x30 cm
- Direktabhängiger mit Federelement
- ⋯ Grundlattung
- Traglattung

**Abbildung 5.26:** Positionen der Tilger Tb01 bis Tb20 auf der Unterdecke, Ansicht von oben

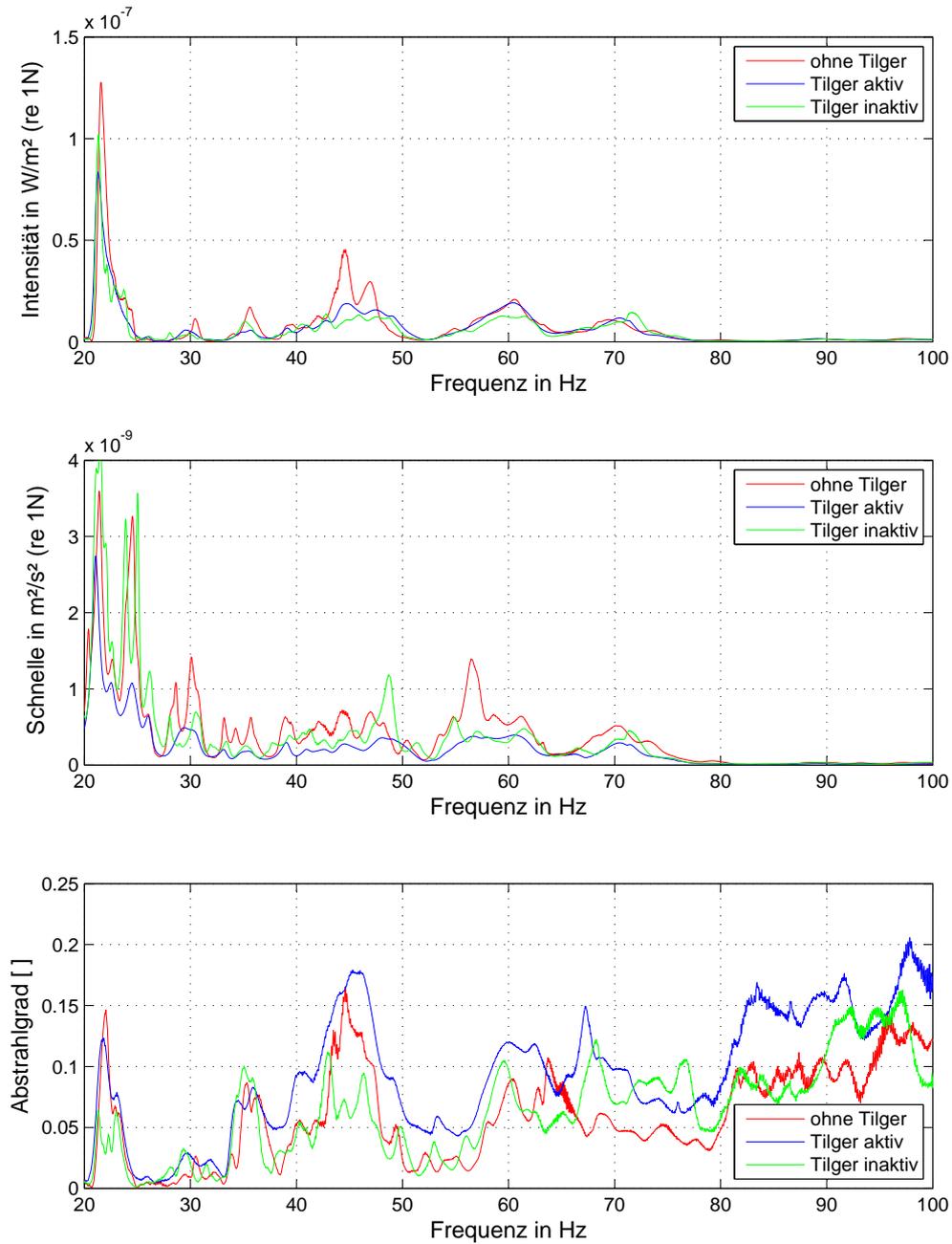


**Abbildung 5.27:** Geöffnete Decke mit eingesetzten Tilgern 01 auf der Unterdecke

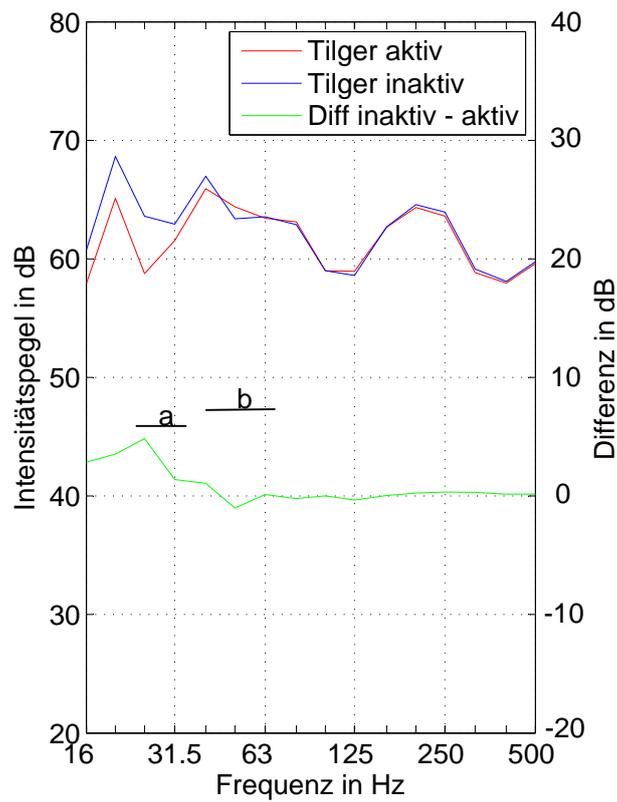
Die Messung der abgestrahlten Schallintensität unter der Decke und der Oberflächenschnelle der Gipskartonplatten erfolgt einmal vor dem Tilgereinbau, einmal mit den frei beweglichen Tilgern und einmal mit inaktiven (blockierten) Tilgern. Die Messung mit inaktiven Tilgern soll die Wirkung der Tilgermasse auf die Unterdecke zeigen, ohne dass dabei ein Tilgungseffekt auftritt. Die Ergebnisse in Abb. 5.28 zeigen, dass durch die Tilger eine deutliche Reduktion der Oberflächenschnelle erreicht wird. Die abgestrahlte Schallintensität wird davon jedoch kaum beeinflusst. Hier wird lediglich im Bereich bei ca.  $45 \text{ Hz}$  eine Verbesserung erzielt, welche jedoch auch bei inaktiven Tilgern zu sehen ist und sich somit auf die zusätzlich eingebrachte Masse zurückführen lässt.

Eine weitere Messung der Intensität erfolgt bei Anregung mit einem Normhammerwerk an vier Positionen auf der Decke. Hier werden die Terzpegel im Bereich von  $16 \text{ Hz}$  bis  $500 \text{ Hz}$  bei Messung mit aktiven und inaktiven Tilgern verglichen (s. Abb. 5.29). Die Pegeldifferenz der beiden Messungen zeigt eine Verbesserung von ca.  $4 \text{ dB}$  im Bereich von  $16 \text{ Hz}$  bis  $25 \text{ Hz}$ . Oberhalb dieses Bereichs wird jedoch auch hier keine Verbesserung erreicht.

Es wird vermutet, dass eine Ursache für die schlechte Wirkung der Tilger auf deren Abmessungen zurück zu führen ist. Aufgrund von kurzen Biegewellenlängen der Unterdecke (nach [60] ca.  $0.3 \text{ m} - 0.7 \text{ m}$ ) werden die Tilger evtl. nicht gleichmäßig an allen vier Ecken angeregt,



**Abbildung 5.28:** Räumlich gemittelte Intensität, quadrierte Schnelle und Abstrahlgrad der Messungen ohne, mit frei beweglichen (Tilger aktiv) und mit inaktiven Tilgern 01



**Abbildung 5.29:** Vergleich der Intensitätspegel mit frei beweglichen Tilgern (Tilger aktiv), inaktiven Tilgern und deren Differenz bei Norm-Hammerwerksanregung sowie die Bandbreiten a und b der Tilger

**Tabelle 5.8:** Optimale Tilgerfrequenz  $f_{T,opt}$  sowie Mittelwerte  $f_0$  und Standardabweichung der Tilger TPb01-TPb20

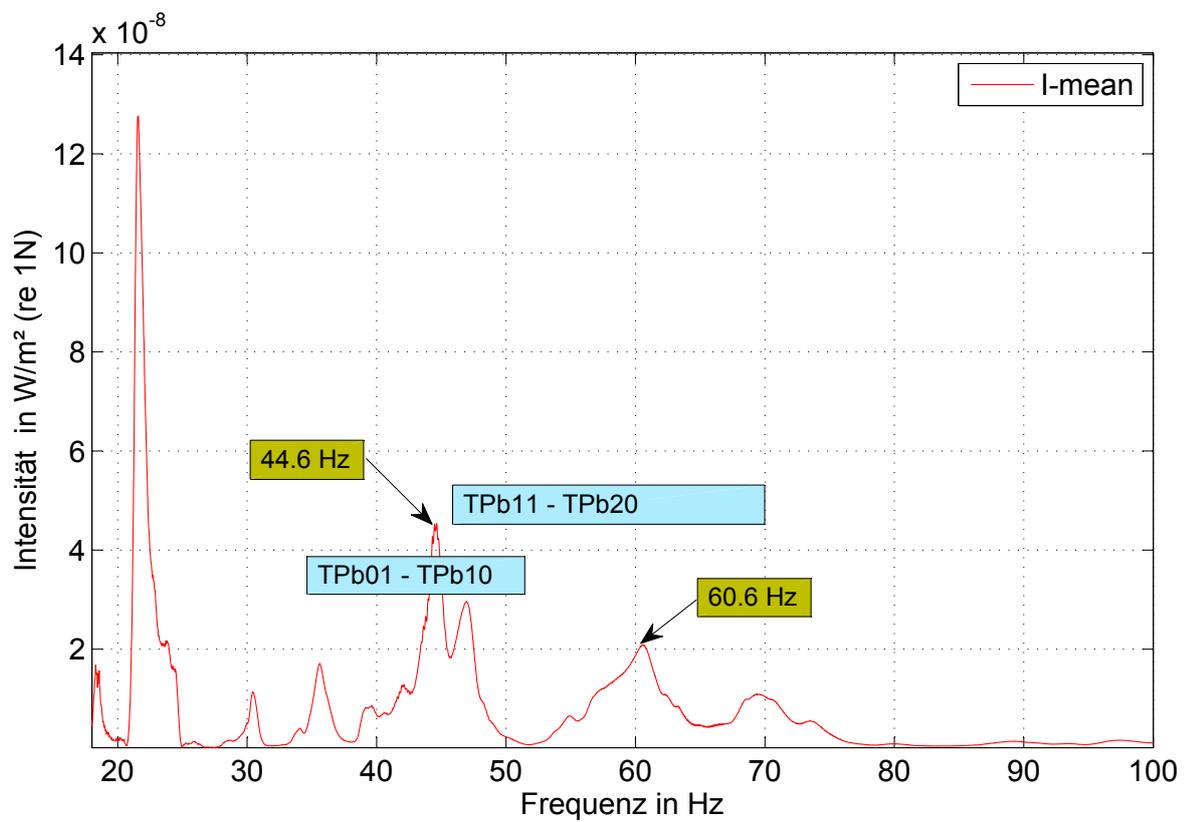
| Typ           | $f_{T,opt}$ in $Hz$ | Mittelwert $f_0$ in $Hz$ | Standardabweichung in $Hz$ |
|---------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|
| TPb01 - TPb10 | 39.1                | 41.3                     | $\pm 0.2$                  |
| TPb11 - TPb20 | 53.1                | 54.5                     | $\pm 1.2$                  |

wodurch der Tilger nicht als ein Einmassenschwinger mit rein translatorischer Bewegung reagiert. Deshalb werden neue Tilger, im Folgenden mit Tilger 02 bezeichnet, angefertigt und die Messung mit diesen Tilgern wiederholt.

## 5.5.2 Tilger 02

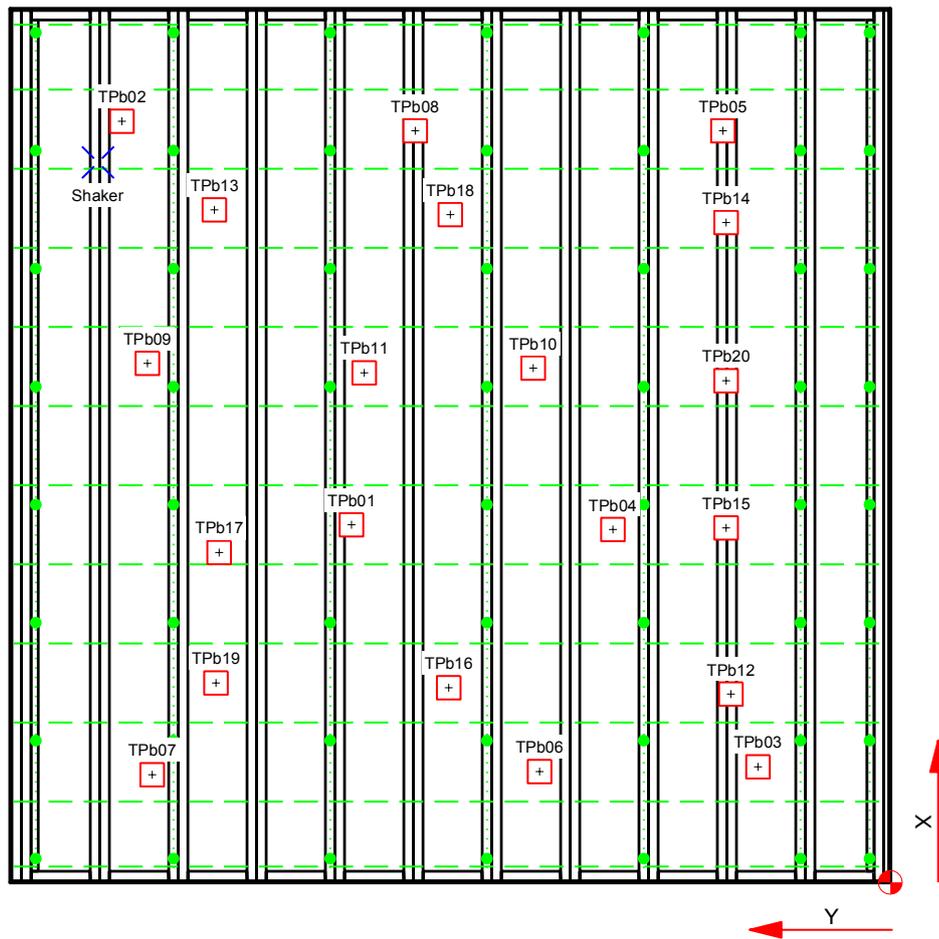
Die neu zu konstruierenden Tilger werden mit Abmessungen von  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$  gefertigt. Um trotz der kleineren Abmessungen ein ausreichendes Gewicht ohne eine zu große Aufbauhöhe zu erreichen, werden diese aus zwei Lagen MDF mit je  $19\text{ mm}$  Stärke und dazwischenliegend sechs Lagen Blei à  $1.2\text{ mm}$  gefertigt. Die Auslegung der Tilger erfolgt für diesen Versuch anhand des zuvor gemessenen Intensitätsspektrums auf  $44.6\text{ Hz}$  und  $60.6\text{ Hz}$  (s. Abb. 5.30). Es soll geprüft werden, ob Maxima in den Intensitätsspektren auf diese Weise reduziert werden können, obwohl bei diesen Frequenzen keine signifikanten Maxima im Spektrum der Oberflächenschnelle sichtbar sind. In Tabelle 5.8 sind die berechneten Resonanzfrequenzen sowie die Mittelwerte und die dazu gehörige Standardabweichung der beiden Tilgergruppen aufgeführt. Wie bei den Tilgern 01 wird eine gute Übereinstimmung mit den optimalen Tilgerfrequenzen nach Gleichung 5.5 erzielt. Die Positionierung der Tilger ist in Abbildung 5.31 dargestellt. Für diesen Versuch werden die Tilger statisch gleichmäßig über die Unterdecke verteilt.

Nach erfolgtem Einsetzen der Tilger 02 werden die Messungen wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.32 dargestellt. Das Ergebnis ist mit den Versuchen mit den Tilgern 01 vergleichbar. Die gemittelte Schnelle konnte durch die Tilger reduziert werden. Im Frequenzbereich bei  $44\text{ Hz}$  und  $60\text{ Hz}$  kann keine signifikante Reduzierung der abgestrahlten Schallintensität erkannt werden. Auffällig ist eine Reduzierung der Intensität aufgrund des Zusatzgewichts durch die Tilger im Bereich von  $44\text{ Hz}$  (bei aktiven und inaktiven Tilgern zu beobachten). Eine Ursache hierfür kann jedoch nicht ausgemacht werden.



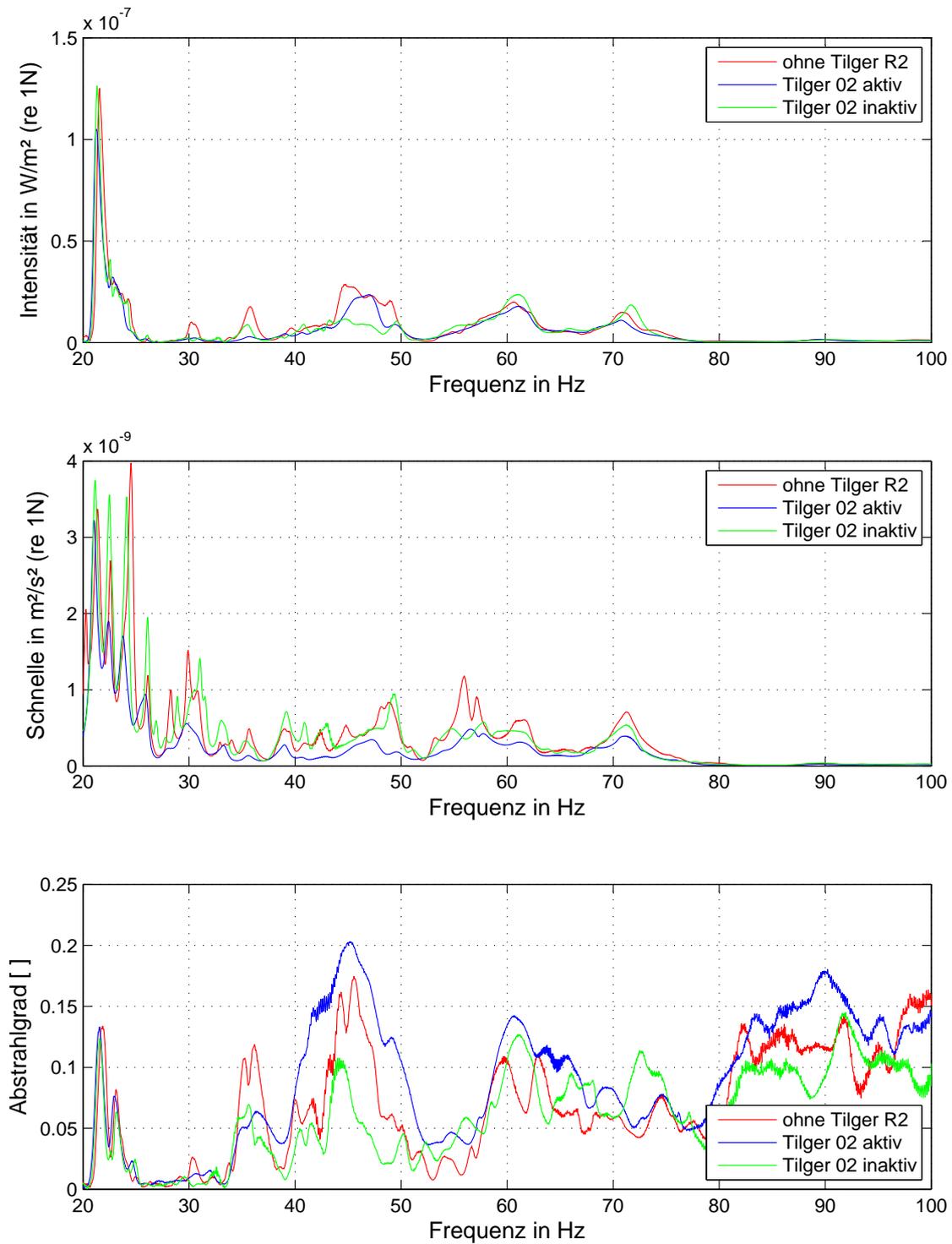
**Abbildung 5.30:** Spektrum der räumlich gemittelten Intensität, referenziert auf  $F_{Anregung}$  sowie die Halbwertsbreiten der zwei Tilgergruppen TPb01-TPb10 und TPb11-TPb20

Fensterfront



- TPb...  
 Tilger 02 14.8x14.8 cm
- Direktabhängiger mit Federelement
- Grundlattung
- Traglattung

**Abbildung 5.31:** Positionen der Tilger Tb01 bis Tb20 auf der Unterdecke, Ansicht von oben



**Abbildung 5.32:** Räumlich gemittelte Intensität, quadrierte Schnelle und Abstrahlgrad der Messungen ohne Tilger, mit frei beweglichen Tilgern (Tilger aktiv) und blockierten Tilgern O2 (Tilger inaktiv) referenziert auf  $F_{Anregung}$

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass der Einsatz von Schwingungstilgern in der Unterdecke keine nennenswerte Reduzierung der abgestrahlten Schalleistung ermöglicht. Weitere Versuche dieser Art werden deshalb nicht durchgeführt. Genaue Beschreibungen der hier dargestellten Messungen können [54] entnommen werden.

## 6 Theoretische Grundlagen

### 6.1 Holz als anisotroper, elastischer Festkörper [23]

Die allgemeine konstitutive Gleichung für den Zusammenhang zwischen dem Spannungs- und dem Dehnungstensor lautet für ein linear-elastisches Material:

$$\sigma_{ij} = C_{ij}^{kl} \varepsilon_{kl} \quad (6.1)$$

mit

$\sigma_{ij}$  Komponente des Spannungstensors

$\varepsilon_{kl}$  Komponente des Dehnungstensors

$C_{ij}^{kl}$  Komponente des Materialtensors

Die Indizes laufen jeweils von 1 bis 3, so dass im allgemeinen Fall der Spannungs- und der Dehnungstensor jeweils  $3 \times 3 = 9$  Einträge haben und der Materialtensor  $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$  Einträge hat.

Aufgrund des Satzes der Zuordnung der Schubspannungen ist der Spannungstensor symmetrisch. Der Dehnungstensor ist ebenfalls symmetrisch. Somit sind beide Tensoren durch sechs Einträge eindeutig bestimmt. Sie lassen sich durch die *Voigtsche* Terminologie in einem Vektor darstellen [32]:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \text{sym} & & \sigma_{33} \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad \text{analog: } \varepsilon_{kl} \longrightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Aus dieser Symmetrie folgt für den Materialtensor, dass seine Komponenten mit innerhalb des oberen bzw. unteren Indexpaares vertauschten Indizes gleich sein müssen [24].

$$C_{ij}^{kl} = C_{ji}^{kl} = C_{ij}^{lk} = C_{ji}^{lk} \quad (6.3)$$

Damit lassen sich die 81 Komponenten auf eine 6 x 6 Matrix reduzieren.

Für den Fall, dass ein elastisches Potential für jedes Volumenelement  $\Pi_{iV}$  existiert (was nach [32] für Holz allgemein angenommen wird), kann man die Spannung  $\sigma_{ij}$  durch

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Pi_{iV}}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (6.4)$$

ableiten [37]. Da bei höheren partiellen Ableitungen die Reihenfolge vertauscht werden darf, gilt:

$$\frac{\partial^2 \Pi_{iV}}{\partial \varepsilon_{ij} \partial \varepsilon_{kl}} = \frac{\partial^2 \Pi_{iV}}{\partial \varepsilon_{kl} \partial \varepsilon_{ij}} \quad (6.5)$$

und somit:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \varepsilon_{kl}} = C_{ij}^{kl} = \frac{\partial \sigma_{kl}}{\partial \varepsilon_{ij}} = C_{kl}^{ij} \quad (6.6)$$

Das bedeutet, dass die 6 x 6 Materialmatrix ebenfalls symmetrisch ist und somit nur 21 verschiedene Einträge besitzt. Dadurch lässt sich die konstitutive Gleichung (6.1) für ein allgemein anisotropes Material unter der Annahme der Existenz eines elastischen Potentials folgendermaßen schreiben:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{11} & C_{11}^{22} & C_{11}^{33} & C_{11}^{23} & C_{11}^{13} & C_{11}^{12} \\ & C_{22}^{22} & C_{22}^{33} & C_{22}^{23} & C_{22}^{13} & C_{22}^{12} \\ & & C_{33}^{33} & C_{33}^{23} & C_{33}^{13} & C_{33}^{12} \\ & & & C_{23}^{23} & C_{23}^{13} & C_{23}^{12} \\ & \text{sym} & & & C_{13}^{13} & C_{13}^{12} \\ & & & & & C_{12}^{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Die elastischen Eigenschaften des Holzes hängen stark von seiner Anatomie (z.B. Faserverlauf) ab. Es können drei Hauptrichtungen (L, T, R) unterschieden werden (s. Abb. 6.1). Diesen drei Hauptrichtungen lassen sich in guter Näherung drei zueinander senkrechte Hauptachsen  $x, y$

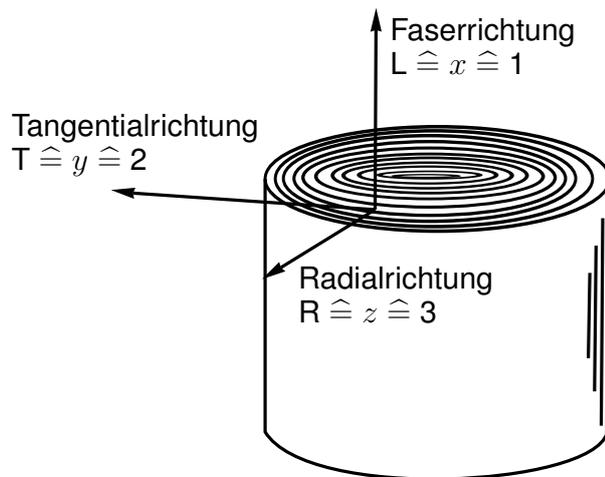


Abbildung 6.1: Koordinatensystem im Holz

und  $z$  zuordnen [22]. Diese kartesischen Koordinatenrichtungen ersetzen in dem mit Gleichung (6.7) beschriebenen Materialmodell die Richtungen 1, 2 und 3:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ \text{sym} & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Dabei werden die ursprünglich vier Indizes einer jeden Komponente des Materialtensors nach der *Voigtschen* Terminologie paarweise zusammengefasst: Doppelt auftretende Indizes werden nur einfach geschrieben und unterschiedliche Indizes nach dem Muster  $9 - i - j$  zusammengezogen [24]. Das tief gestellte Paar wird schließlich vor das hoch gestellte geschrieben. Beispiel:

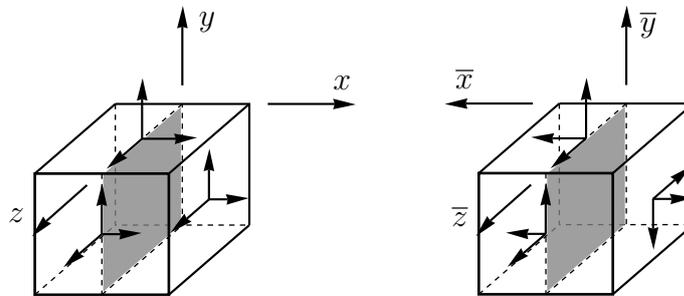
$$\begin{matrix} 22 \\ 11 \end{matrix} \longrightarrow 12, \begin{matrix} 12 \\ 13 \end{matrix} \longrightarrow 56$$

Nach [32] ist das Material Holz zu allen drei Koordinatenebenen aus Abbildung 6.1 symmetrisch. Die Symmetrie bezüglich der  $x - y$  Ebene gilt nur, falls das betrachtete Volumen so groß ist, dass der schroffe Übergang von Spät- zu Frühholz (Jahrringe) nicht ins Gewicht fällt. Da die drei Symmetrieebenen orthogonal zueinander stehen, spricht man von einem orthogonal-anisotropen (=orthotropen) Material.

Abbildung 6.2 zeigt eine Symmetrieebene ( $y - z$  Ebene) des Holzes mit einem Referenzkoo-

dinatensystem  $x, y, z$  bzw. einem an der Symmetrieebene gespiegeltem Koordinatensystem  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ . Bezieht man sich bei der Beschreibung der Deformation einmal auf die ungespiegelte und einmal auf die gespiegelte Konfiguration, so erhält man aus der Vorzeichenkonvention für die Komponenten des Spannungstensors:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{\bar{x}\bar{x}} \\ \sigma_{\bar{y}\bar{y}} \\ \sigma_{\bar{z}\bar{z}} \\ \sigma_{\bar{y}\bar{z}} \\ -\sigma_{\bar{x}\bar{z}} \\ -\sigma_{\bar{x}\bar{y}} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{\bar{x}\bar{x}} \\ \varepsilon_{\bar{y}\bar{y}} \\ \varepsilon_{\bar{z}\bar{z}} \\ \varepsilon_{\bar{y}\bar{z}} \\ -\varepsilon_{\bar{x}\bar{z}} \\ -\varepsilon_{\bar{x}\bar{y}} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$



**Abbildung 6.2:** Material mit einer Symmetrieebene ( $y$ - $z$  Ebene) und positiven Komponenten des Spannungstensors [32]

Gleichung (6.8) beschreibt die Spannungs-Verzerrungs-Beziehung im Referenzkoordinatensystem. Die selbe Beziehung lautet im gespiegelten Koordinatensystem:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\bar{x}\bar{x}} \\ \sigma_{\bar{y}\bar{y}} \\ \sigma_{\bar{z}\bar{z}} \\ \sigma_{\bar{y}\bar{z}} \\ \sigma_{\bar{x}\bar{z}} \\ \sigma_{\bar{x}\bar{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & \text{sym} & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{\bar{x}\bar{x}} \\ \varepsilon_{\bar{y}\bar{y}} \\ \varepsilon_{\bar{z}\bar{z}} \\ \varepsilon_{\bar{y}\bar{z}} \\ \varepsilon_{\bar{x}\bar{z}} \\ \varepsilon_{\bar{x}\bar{y}} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Der Materialtensor ist dabei in beiden Fällen identisch, da aufgrund der Symmetrie die elastischen Eigenschaften in beiden Konfigurationen nicht unterschieden werden können.

Setzt man nun die Gleichungen (6.9) in Gleichung (6.8) ein und subtrahiert Gleichung (6.10), so

erhält man:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -2\sigma_{xz} \\ -2\sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ \text{sym} & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -2\varepsilon_{xz} \\ -2\varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Dies ist nur dann erfüllt, falls  $C_{15} = C_{16} = C_{25} = C_{26} = C_{35} = C_{36} = C_{45} = C_{46} = 0$  gilt. Somit bekommt die konstitutive Gleichung folgende Form:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & 0 & 0 \\ & & C_{33} & C_{34} & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Führt man das mit den Gleichungen (6.9) bis (6.12) beschriebene Procedere zusätzlich mit einer z. B. an der  $x - y$  Ebene gespiegelten Koordinaten-Konfiguration durch, so lassen sich die elastischen Parameter weiter (auf insgesamt 9) reduzieren: [32]

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Anschaulich kann Gleichung (6.13) so verstanden werden, dass es in einem orthotropen Material keine Kopplung zwischen Längsdehnungen und Schubverzerrung gibt. Die Schubverzerrungen sind, im Gegensatz zu den Längsdehnungen, untereinander nicht gekoppelt.

Will man die Komponenten  $C_{ij}$  des Materialtensors durch die Ingenieurskonstanten  $E$ ,  $\nu$  und  $G$  ausdrücken, so ist es nützlich, die konstitutive Gleichung (6.13) verzerrungsexplizit anzuschrei-

ben. Dabei wird der Materialtensor  $\mathbf{C}$  zum Nachgiebigkeitstensor  $\mathbf{N}$  invertiert.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & N_{22} & N_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & N_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & N_{44} & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & & N_{55} & 0 \\ & & & & & N_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

Hinweis:  $\gamma_{ij} = \varepsilon_{ij} + \varepsilon_{ji} = 2\varepsilon_{ij}$

Das Verhältnis zwischen den Schubspannungen  $\tau_{ij}$  und den Schubverzerrungen  $\gamma_{ij}$  wird durch den Schubmodul  $G_{ij}$  bestimmt. Die Einträge  $N_{44} - N_{66}$  sind somit trivial. Für die Bestimmung der Komponenten die das Verhältnis zwischen Längsdehnungen und Normalspannungen beschreiben hilft ein Gedankenexperiment [16]:

In einem in einer Prüfmaschine eingespannten Zugstab mit rechteckigem Querschnitt herrscht weit genug von der Einspannstelle der Spannungszustand:

$$\sigma_x \neq 0, \quad \sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = \tau_{xy} = 0 \quad (6.15)$$

Für die Dehnungen gilt:

$$\varepsilon_x \neq 0, \quad \varepsilon_y \neq 0, \quad \varepsilon_z \neq 0, \quad \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = \gamma_{xy} = 0 \quad (6.16)$$

Damit ergeben sich die ersten Elemente des Nachgiebigkeitstensors wie folgt:

$$N_{11} = \frac{\varepsilon_x}{\sigma_x} = \frac{1}{E_x}, \quad N_{21} = \frac{\varepsilon_y}{\sigma_x} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \frac{1}{E_x} = -\frac{\nu_{xy}}{E_x}, \quad N_{31} = \frac{\varepsilon_z}{\sigma_x} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \frac{1}{E_x} = -\frac{\nu_{xz}}{E_x} \quad (6.17)$$

Die verbleibenden Komponenten lassen sich mit analogen Gedankenexperimenten veranschau-

lichen. Der komplette Nachgiebigkeitstensor  $\mathbf{N}$  lautet:

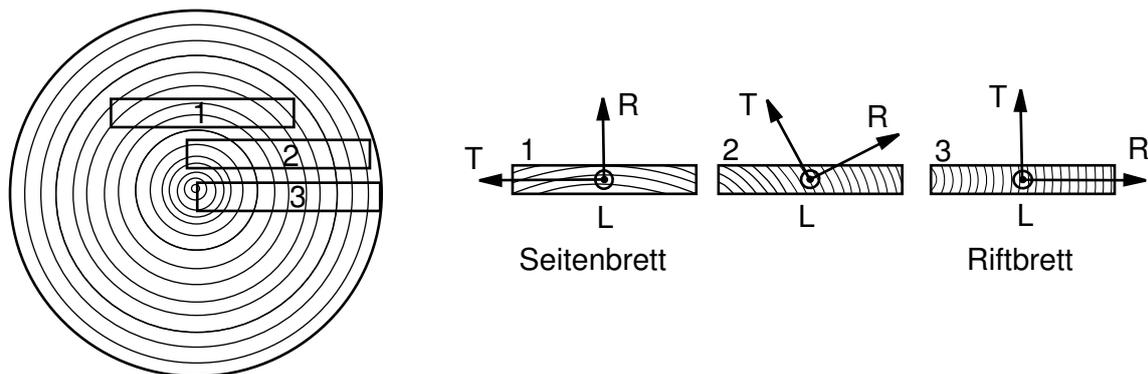
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

Der Materialtensor  $\mathbf{C}$  ergibt sich durch Invertieren von  $\mathbf{N}$ . Auf die Darstellung der durch die Invertierung entstehenden langen Ausdrücke wir hier verzichtet.

Aus der Symmetriebedingung für den Materialtensor folgt:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y}, \quad \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z}, \quad \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z} \quad (6.19)$$

Somit sind die Poissonzahlen  $\nu_{ij}$  und  $\nu_{ji}$  zwar nicht zwangsweise identisch, aber über  $E_i$  und  $E_j$  miteinander verknüpft. Damit sind für die Beschreibung eines orthotropen Materials lediglich 9 unterschiedliche Konstanten erforderlich. Um eine Verwechslung zwischen  $\nu_{ij}$  und  $\nu_{ji}$  auszuschließen, wird im englischen Sprachgebrauch zwischen einem „minor“ und einem „major Poisson’s ratio“ unterschieden [4]. Falls  $E_i > E_j$  dann ist  $\nu_{ij}$  der „major“ und  $\nu_{ji}$  der „minor Poisson’s ratio“. Dies ist bei der Eingabe in Computerprogramme zu berücksichtigen.



**Abbildung 6.3:** mögliche Schnittarten von Holzbrettern [22]

Da im konstruktiven Ingenieurholzbau Bretter unterschiedlicher Schnittarten (s. Abb. 6.3) zum Einsatz kommen und nicht vorausgesagt werden kann, welche Schnittart wo zum Einsatz kommt, ist es nicht sinnvoll, zwischen den anatomischen Richtungen T und R zu unterscheiden. Diese

beiden Richtungen werden durch den Begriff quer oder senkrecht zur Faser ( $\perp$ ) zusammengefasst. Die anatomische Richtung L wird mit parallel zur Faser ( $\parallel$ ) bezeichnet [22]. Diese Vereinfachung wird auch im Rahmen dieser Arbeit für die zu untersuchenden Brettsperrholzplatten angenommen. Damit reduzieren sich die zu identifizierenden elastischen Parameter des Holzes auf 6. Es wird angesetzt:

$$\begin{aligned} E_x &= E_{\parallel}, & E_y &= E_z = E_{\perp}, & \nu_{xy} &= \nu_{xz} = \nu_{\parallel\perp}, & \nu_{yz} &= \nu_{\perp\perp} \\ G_{xy} &= G_{xz} = G_{\parallel\perp}, & G_{yz} &= G_{\perp\perp} \end{aligned} \quad (6.20)$$

$G_{\perp\perp}$  wird auch als Rollschubmodul bezeichnet. Insbesondere die Lagen, welche senkrecht zu der Haupttragrichtung einer Brettsperrholzdecke laufen, werden auf Rollschub beansprucht.

## 6.2 Schallabstrahlung von endlichen Platten [60]

Schall breitet sich über Wellen aus. Dabei wird das Transportmedium Luft lokal komprimiert, wodurch benachbarte Teilchen durch einen entsprechenden Impuls zu Bewegungen angeregt werden. Die Bewegungen und Verformungen lassen sich in Form von kinetischer und potentieller Energie pro Volumen als Energiedichte darstellen. [38]

$$E_{gesV} = E_{potV} + E_{kinV} = \frac{1}{2} \left( \rho_A \cdot v^2 + \frac{p^2}{\rho_A \cdot c_A} \right)$$

Im Folgenden sollen die theoretischen Grundlagen zur Ermittlung des Abstrahlverhaltens sowie der Schalleistung von Decken erläutert werden. Ausgehend von der Beschaffenheit eines Schallfeldes und der insgesamt darin vorhandenen Energiedichte  $E_{gesV}$  werden Schalleistung, Schallintensität und Abstrahlung hergeleitet.

### 6.2.1 Schalleistung und Schallintensität

Eine schwingende Decke strahlt Schallenergie ab. Die Schalleistung gibt an, wie viel Energie pro Zeiteinheit von der Schallquelle, in diesem Fall der Decke, abgestrahlt wird. Für eine eindimensionale Wellenausbreitung steht die Schalleistung  $P(x,t)$  mit der Energie  $E(x,t)$  in

folgendem Zusammenhang:

$$P(x,t) = \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} \quad (6.21)$$

Da die Schalleistung einer Quelle die Quellstärke quantifiziert, ist diese im Gegensatz zum Schalldruck unabhängig vom Schallfeld. Die Schalleistung kann durch Integration über eine die Schallquelle umgebende Hüllfläche ermittelt werden. Dabei wird über das Produkt von Schalldruck und der senkrecht zur Hüllfläche auftretende Schallschnelle integriert. Unter Vernachlässigung der Dämpfung ist die Schalleistung unabhängig von der Form der Hüllfläche und der Entfernung zur Quelle. In vektorieller Schreibweise ergibt sich unter dem Integral ein Skalarprodukt aus den gerichteten Größen von Schnelle  $\mathbf{v}$  und Fläche  $d\mathbf{S}$  multipliziert mit der ungerichteten Größe des Drucks  $p$ .

$$P = \int_{(S)} p \cdot \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = \int_{(S)} \mathbf{I} \cdot d\mathbf{S} \quad (6.22)$$

Vektoren werden im Rahmen dieser Arbeit fett gedruckt.

Die Länge des Flächenvektors entspricht der Fläche und seine Richtung steht senkrecht auf dieser. Zeigt die Luftschallschnelle parallel zu einer Fläche, wird durch diese entsprechend dem Skalarprodukt  $\mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = |\mathbf{v}| \cdot |d\mathbf{S}| \cdot \cos \alpha$  keine Leistung transportiert. Das Produkt aus dem Vektor der Luftschallschnelle und dem Skalar des Schalldrucks ergibt den Vektor der Schallintensität  $\mathbf{I}$ . Sie entspricht der auf die durchströmte Fläche bezogenen Schalleistung und damit dem Fluss der Schallenergie im Raum. Man spricht auch von der Schalleistungsflächendichte. Als vektorielle Größe besitzt sie neben dem Betrag eine Richtung. Dadurch lässt sich sowohl die Richtung des Energieflusses aufzeigen, als auch die Schallquelle orten [7] [38].

Sowohl für Schallintensität als auch für Schalleistung ist eine Darstellung in Pegeln sinnvoll. Die Bezugswerte sind dabei  $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$  bzw.  $P_0 = 10^{-12} W$ . Sie entsprechen den physikalischen Werten an der Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Gehörs bei einer Frequenz von in etwa 1 kHz unter Ansatz einer ebenen Welle mit einer Querschnittsfläche von  $1 m^2$ .

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \left[ \text{dB re } 10^{-12} \frac{W}{m^2} \right] \quad (6.23)$$

$$L_W = 10 \lg \frac{P}{P_0} \left[ \text{dB re } 10^{-12} W \right] \quad (6.24)$$

In Kapitel 3.2 wird beschrieben, wie die Intensität mittels einer pp-Sonde gemessen werden kann, um daraus die Schalleistung zu berechnen. Im Folgenden wird auf Basis der gemessenen Körperschallschnelle eine Alternative zur Ermittlung der Schalleistung erläutert.

## 6.2.2 Ermittlung der von einer als ebener Strahler abgebildeten Platte abgestrahlten Schalleistung

Im Deckenprüfstand der Hochschule Rosenheim befindet sich die zu prüfende Decke samt abgehängter Unterdecke in einer Aussparung der Stahlbetondecke. Eine detaillierte Beschreibung von Decke und Prüfstand ist in Abschnitt 3.1 zu finden. Die Unterdecke wird näherungsweise als ebener Strahler modelliert, der sich innerhalb einer unendlich großen schallharten Fläche, der umgebenden Stahlbetondecke, befindet. Unter dieser Annahme ist es möglich, die Schnelleverteilung auf der gesamten Ebene als eine Summe von ebenen Wellen darzustellen und eine geschlossene Lösung für die Abstrahlung zu ermitteln. Die Schnelle an der Strahleroberfläche, an der Unterseite der Unterdecke,  $v = v(x, y, \Omega)$  erhält man aus einer harmonischen Analyse an einem Finite-Elemente-Deckenmodell oder aus Messungen in Abhängigkeit der Erregerkreisfrequenz  $\Omega$ . Für die Stahlbetondecke wird  $v = 0$  angesetzt. Durch eine zweifache Fouriertransformation vom Orts- in den Wellenzahlbereich ergeben sich die spektralen Anteile der Schnelle:

$$\check{v}(k_x, k_y, \Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v(x, y, \Omega) e^{jk_x x} e^{jk_y y} dx dy \quad (6.25)$$

Hierbei sind  $k_x$  und  $k_y$  die Kreiswellenzahlen, im Folgenden verkürzt Wellenzahlen genannt, für die Raumrichtungen  $x$  und  $y$  der Ebene der Deckenplatte. Bei der Integration über die unendliche  $x$ - $y$ -Ebene für  $z = 0$ , leistet der Bereich außerhalb des Strahlers keinen Beitrag, da dort  $v = 0$  ist.

Der analog zur Schnelle gewählte Ansatz des Schalldrucks im Raum

$$p(x, y, z, t) = \check{p}(k_x, k_y, \Omega) e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} e^{-jk_z z} e^{j\Omega t} \quad (6.26)$$

erfüllt die Wellengleichung des akustischen Fluids

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 p}{c_A^2 \partial t^2} = 0, \quad (6.27)$$

wenn gilt:

$$k_z = \sqrt{k_A^2 - k_x^2 - k_y^2} = \sqrt{k_A^2 - k_B^2} \quad (6.28)$$

mit

$$k_B = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (6.29)$$

Hierbei ist  $c_A$  die Schallgeschwindigkeit in der Luft und  $k_A = \frac{\Omega}{c_A}$  deren frequenzabhängige Wellenzahl. Mit  $k_B$  ist die Biegewellenzahl bezeichnet. Im Folgenden werden  $\check{p}$  und  $\check{v}$  verkürzt notiert und die Exponentialfunktionen mit  $E$  abgekürzt.

$$E = e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} e^{-jk_z z} e^{j\Omega t} \quad (6.30)$$

An der Grenzfläche  $z = 0$  wird der senkrecht zur Platte orientierte Anteil der Luftschallschnelle  $v_z$  mit der Plattenschnelle  $v$  gleichgesetzt. Gemäß dem Trägheitsgesetz

$$\nabla p = -\rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (6.31)$$

wobei  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} e_x + \frac{\partial}{\partial y} e_y + \frac{\partial}{\partial z} e_z$  den Nabla-Operator darstellt, führt diese Randbedingung zu folgendem Ausdruck:

$$v_{z=0} = \frac{-1}{i\Omega\rho_A} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\check{p}k_z}{\Omega\rho_A} E. \quad (6.32)$$

Daraus ergibt sich für den Schalldruck für jede Wellenzahl und Frequenz die Schwingamplitude  $\check{p}$  zu

$$\check{p} = \frac{\Omega\rho_A}{k_z} \check{v} = \rho_A c_A \frac{k_A}{k_z} \check{v} \quad (6.33)$$

Der Schalldruck im Zeit-Ortsbereich kann hieraus mittels Superposition der spektralen Kompo-

nenten ermittelt werden:

$$p(x,y,z,\Omega) = \frac{\rho_A c_A}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{k_A}{k_z} \check{v} E \, dk_x dk_y \quad (6.34)$$

Die durch eine Ebene  $z = z_p$  übertragene Schallleistung eines ebenen Strahlers mit den Abmessungen  $a \times b$  kann, wie folgt, berechnet werden:

$$P(\Omega) = \frac{1}{2} \Re \left[ \int_0^a \int_0^b p v^* \, dx dy \right] \quad (6.35)$$

wobei mit \* versehene Ausdrücke den konjugiert komplexen Wert darstellen. Die Schallschnelle in der Luft für eine harmonische Anregung lässt sich aus Gleichung (6.25) zu

$$v = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \check{v} E \, dk_x dk_y. \quad (6.36)$$

ermitteln. Durch Einsetzen der Gleichungen von Schalldruck (6.34) und Schnelle (6.36) in Gleichung (6.35) ergibt sich die im zeitlichen Mittel abgestrahlte Schallleistung in Abhängigkeit von  $\check{v}$ ,  $k_A$  und  $k_z$  zu [11]:

$$P(\Omega) = \frac{1}{2} \frac{\rho_A c_A k_A}{4\pi^2 4\pi^2} \Re \left\{ \int_0^a \int_0^b \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\check{v}}{k_z} E \, dk_x dk_y \right] \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \check{v}^* E^* \, dk_x dk_y \right] dx dy \right\} \quad (6.37)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{\rho_A c_A}{4\pi^2} \Re \left[ \int \int \frac{k_A}{\sqrt{k_A^2 - k_B^2}} \check{v} \check{v}^* dk_x dk_y \right] \quad (6.38)$$

Nach einer Diskretisierung wird das analytische Integral von Gleichung (6.38) als numerische Summe ausgedrückt.

$$P(\Omega) = \frac{1}{2} \frac{\rho_A c_A}{4\pi^2} \Re \left[ \sum_r \sum_s \frac{k_A}{k_z} \check{v} \check{v}^* \Delta k_x \Delta k_y \right] \quad (6.39)$$

Somit kann die abgestrahlte Schallleistung eines ebenen Strahlers numerisch anhand von diskreten Werten des Körperschallschnellefelds  $v(r \Delta x, s \Delta y, \Omega)$  ermittelt werden. Im Rahmen die-

ser Arbeit wird dieses Verfahren in Kapitel 8.1 sowohl für Messungen als auch für numerische Simulationen angewandt und validiert [42] [3] [29].

### 6.2.3 Abstrahlverhalten einer unendlichen ausgedehnten Platte

Wie in Abschnitt 6.2.2 gezeigt wird das Abstrahlverhalten einer unendlich ausgedehnten Platte durch die Biegewellenzahl des Strahlers

$$k_B = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (6.40)$$

in Bezug auf die der Luft  $k_A$  charakterisiert (s. Glg. 6.29).

- Für  $k_B < k_A$  ist das Verhältnis aus Schalldruck und Schallschnelle (s. Glg. 6.33) real. Damit sind Druck und Schnelle phasengleich. Es wird ein Fernfeld hervorgerufen, d.h. eine schräg fortschreitende, ebene Welle abgestrahlt (s. Abb. 6.4). Der Abstrahlwinkel resultiert aus der Spuranpassung, d.h. der Kopplung der Wellenlängen von Plattenschwingung und Luftschall. Mit abnehmender Biegewellenlänge nähert sich diese der Luftschallwellenlänge und die Abstrahlung wird größer. Gleichzeitig geht der Abstrahlwinkel  $\vartheta$  gegen  $90^\circ$ . Er ergibt sich zu:  $\sin \vartheta = -\frac{\lambda_A}{\lambda_B}$ .

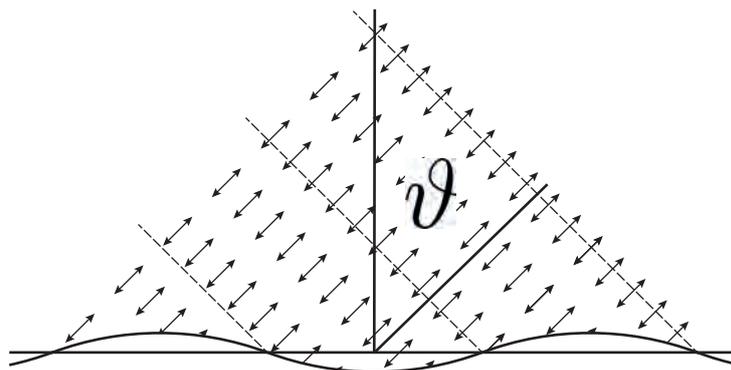


Abbildung 6.4: Fernfeld

- Für  $k_B = k_A$  sind die Wellenzahlen und -längen der gleichen Frequenz für Platte und Luft

gleich groß. Da  $k_z$  gegen Null geht, ergibt sich nach Gleichung 6.33 eine theoretisch unendlich große Abstrahlung. Praktisch führen Dämpfungseffekte zu einem endlichen Wert. Der Abstrahlwinkel  $\vartheta$  beträgt  $90^\circ$ , man spricht von streifender Abstrahlung.

- Für  $k_B > k_A$  ist das Verhältnis aus Schalldruck und Schallschnelle (s.Glg. 6.33) imaginär. Damit wird im zeitlichen Mittel keine Schalleistung abgestrahlt. Das Schallfeld fällt mit der Entfernung zur Decke exponentiell ab (Nahfeld). In diesem Bereich sind die Komponenten der Schallschnelle in der Ebene um  $90^\circ$  phasenversetzt zu denen in  $z$ -Richtung. Die Teilchen beschreiben somit Ellipsen (s. Abb. 6.5). Es wandert die Luft von den Strahlerschwingbergen in die benachbarten Strahlerschwingtäler und „entgeht“ so der Kompression. Dieses Verhalten wird auch als akustischer Kurzschluss bezeichnet [11] [3].

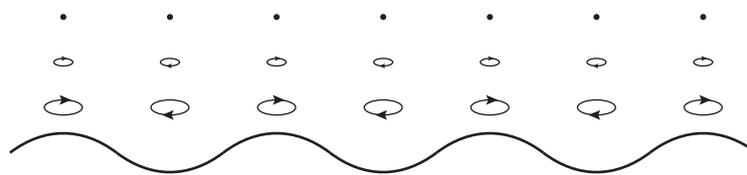


Abbildung 6.5: Nahfeld

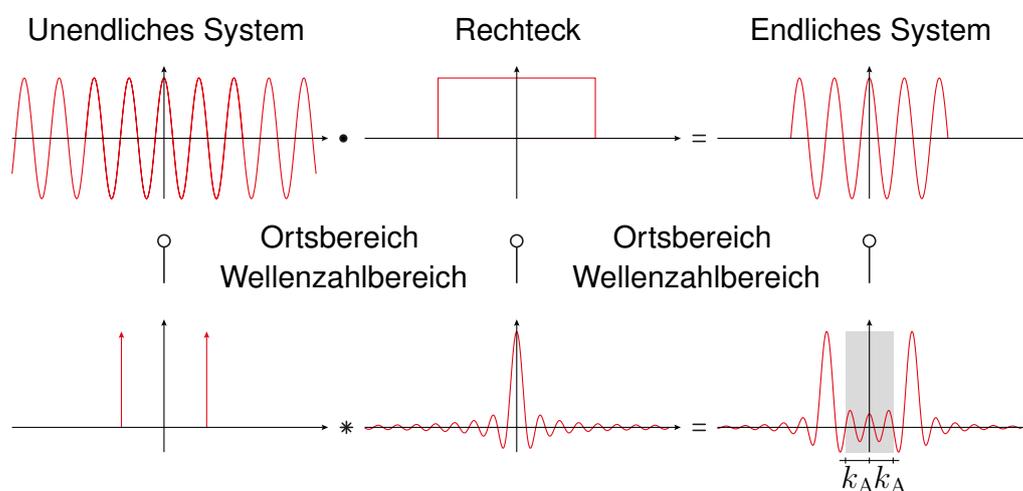
Die Wellenzahl  $k_B$  wird häufig über die Biegeschwindigkeit  $c_B = \frac{\Omega}{k_B}$  charakterisiert. Für eine freie Ausbreitung auf einer Biegeplatte ist diese frequenzabhängig. Mit der Koinzidenzfrequenz  $f_g$  bezeichnet man die Frequenz, bei der die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Biegeplatte der Schallgeschwindigkeit in der Luft entspricht, bzw.  $k_A = k_B$  gilt. Sie beschreibt damit den Übergang von Fern- zu Nahfeld.

## 6.2.4 Übergang zur endlichen Platte

Der Übergang zu einer endlichen Platte soll anhand einer Schwingung in einer Cosinusfunktion veranschaulicht werden. In Abbildung 6.6 ist die Körperschallschnelle im Wellenzahlbereich für eine Erregerschwingung unterhalb der Koinzidenzfrequenz aufgetragen. Aufgrund der endlichen Integrationsgrenzen im Ortsbereich wird die unendliche Schwingform mit einer Rechteckfunktion multipliziert. Dies entspricht einer Faltung der Wellenzahl der hier für die unendliche

Schwingform angenommenen Cosinusfunktion mit dem Sinus-Cardinalis. Dessen Nebenbänder führen zu dem physikalischen Leakage, sofern die Fensterfunktion, d.h. die Plattengröße, nicht ein ganzzahliges Vielfaches der Strahlerwellenlänge ist. Dies führt auch im Falle kurzer Wellenlängen (Schwingungen unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz) zu Abstrahlung im Fernfeldbereich ( $k_B < k_A$ ). Je größer die Platte, desto kleiner sind die Nebenbänder und desto geringer ist die Abstrahlung.

In Abbildung 6.7 ist das Abstrahlverhalten einer endlichen Platte aufgrund einer Anregung unterhalb der Koinzidenzgrenzfrequenz für den Orts- und Wellenzahlbereich zusammengefasst.



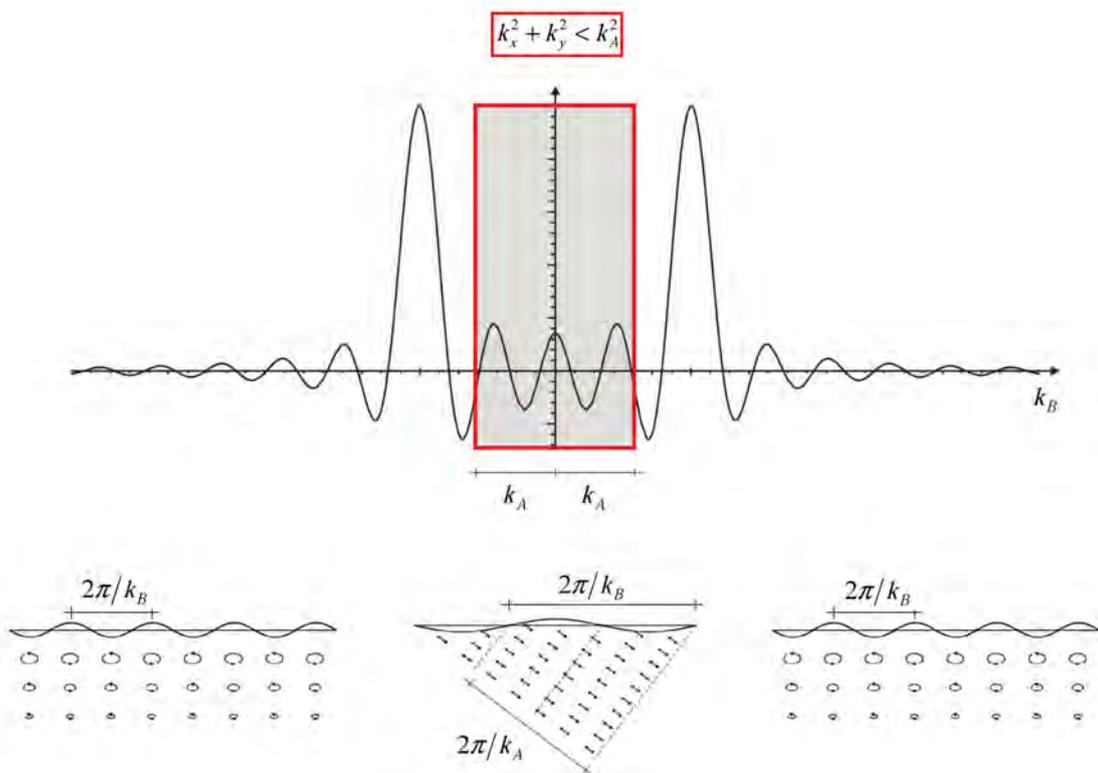
**Abbildung 6.6:** Fouriertransformation der Schnelleverteilung einer endlichen Platte vom Orts- in den Wellenzahlbereich [29]

## 6.2.5 Abstrahlgrad und Abstrahlmaß

In der Praxis wird versucht das in Abschnitt 6.2.3 beschriebene Verhalten über einfach aufbereitete Größen zu charakterisieren. Der Abstrahlgrad  $\sigma$  beschreibt das Verhältnis der abgestrahlten Schalleistung zur Abstrahlung einer konphas schwingenden ebenen Fläche.

$$\sigma = \frac{P}{\rho_A c_A S \bar{v}^2} \quad (6.41)$$

Hier ist  $P$  die von einem Körper der Oberfläche  $S$  abgestrahlte Schalleistung, welche in Abschnitt 6.2.1 beschrieben wird.  $\rho_A \cdot c_A$  entspricht der Impedanz der Luft und  $\bar{v}^2$  stellt das örtliche Mittel des Schnelleffektivwert-Quadrates der strahlenden Fläche dar. Handelt es sich um eine



**Abbildung 6.7:** Abstrahlbedingung im Wellenzahlbereich (oben) und Ortsbereich (unten) [11]

konphas schwingende ebene Fläche, so wird der Abstrahlgrad zu 1, sofern die Flächenabmessungen deutlich größer sind als die Wellenlänge der Luft. Unter dieser Annahme kann die Luft seitlich nicht entweichen und keinen akustischen Kurzschluss erzeugen. Es herrschen somit Fernfeldbedingungen mit ebener Abstrahlung, senkrecht zur Fläche.

$$p = \rho_A c_A v \tag{6.42}$$

Die Schalleistung ergibt sich hierfür zu:

$$P_{\sigma=1} = S p v = \rho_A c_A S v^2. \tag{6.43}$$

Somit ist der Abstrahlgrad ein Maß dafür, wie viel Leistung eine Decke abstrahlt in Relation zum gleich großen Flächenanteil einer unendlich großen, konphas schwingenden Fläche gleicher mittlerer Schnelle.

$$\sigma = \frac{P}{P_{\sigma=1}} \tag{6.44}$$

Im Falle von inhomogenen oder stark gedämpften Bauteilen kann es zu einem Abstrahlgrad größer eins kommen, in der Regel ist er unter- und oberhalb der Koinzidenzfrequenz  $f_g$  kleiner oder gleich eins.

Durch Einsatz der Parsevalschen Gleichung

$$\overline{v^2} S = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |v(x, y, \Omega)|^2 dx dy = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\check{v}(k_x, k_y, \Omega)|^2 dk_x dk_y \quad (6.45)$$

und unter Berücksichtigung von Gleichung 6.35 und 6.38 lässt sich der Abstrahlgrad durch Integrieren im Wellenzahlbereich ermitteln.

$$\sigma = \frac{\int \int \frac{k_A}{\sqrt{k_A^2 - k_B^2}} |\check{v}(k_x, k_y, \Omega)|^2 dk_x dk_y}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\check{v}(k_x, k_y, \Omega)|^2 dk_x dk_y} \quad (6.46)$$

Die Abstrahlung kann bei einer Bezugsfläche von  $S_0 = 1 \text{ m}^2$ , einer Bezugsschnelle von  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$  sowie einer Bezugsleistung von  $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$  in logarithmischer Form als Abstrahlmaß dargestellt werden. Die Bezugswerte ergeben sich aus den physikalischen Werten bei der Wahrnehmungsschwelle des menschlichen Gehörs bei einer Frequenz von  $1 \text{ kHz}$  [42] [7].

$$10 \lg \sigma = 10 \lg \frac{P}{P_0} - 10 \lg \frac{\overline{v^2}}{v_0^2} - 10 \lg \frac{S}{m^2} \quad (6.47)$$

## 6.3 Modalanalyse [60]

Zur Kalibrierung der numerischen Berechnungen sollen die Eigenmoden der Teststrukturen mit den Eigenmoden der FE-Simulationen verglichen werden. Die ungedämpften Eigenmoden eines Finite-Elemente-Modells können mithilfe einer Modalanalyse ermittelt werden. In diesem Abschnitt werden hierzu die theoretischen Grundlagen erläutert.

Bei der Methode der Finiten Elemente werden die unendlich vielen Freiheitsgrade eines kontinuierlichen Systems auf die Freiheitsgrade (=mögliche Verschiebungen) der Elementknoten reduziert. Im folgenden soll dies anhand eines achtknotigen Volumenelementes veranschaulicht werden. Bei einem solchen Element hat jeder Knoten drei mögliche Verschiebungen. Jedes Element hat also  $3 \cdot 8 = 24$  Freiheitsgrade, welche in dem Vektor  $\mathbf{u}_e(t)$  zusammengefasst werden.

Zwischen diesen Verschiebungen der Knoten und dem Verschiebungsfeld des Elements wird ein Zusammenhang angenommen, d.h. es wird mittels sogenannter Formfunktionen eine Aussage darüber getroffen, wie sich das Element in Abhängigkeit seiner Knotenverschiebungen verformt. Diese Formfunktionen werden in der Matrix  $\mathbf{N}(x,y,z)$  zusammengefasst. Das Verschiebungsfeld eines Elements ergibt sich damit zu [51]:

$$\bar{\mathbf{u}}(x,y,z,t) = \mathbf{N}(x,y,z)\mathbf{u}_e(t) \quad (6.48)$$

Die Ableitungen des Verschiebungsfeldes nach den Ortskoordinaten führen zu den Elementverzerrungen. Die Ableitungen der Formfunktionen  $\mathbf{N}$  werden in der Matrix  $\mathbf{B}$  zusammengefasst. Somit ergeben sich die Dehnungen zu:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_e \quad (6.49)$$

Meistens werden für die Verschiebungen und die Beschleunigungen die gleichen Formfunktionen verwendet. Damit ergibt sich die *D'Alembertsche* Trägheitskraft zu [39]:

$$\mathbf{p}_i(x,y,z,t) = -\rho\mathbf{N}(x,y,z)\mathbf{u}_e^{\bullet\bullet}(t) \quad (6.50)$$

Die Bewegungsgleichung des Finiten Elements wird im Folgenden mit dem Prinzip der virtuellen Arbeit hergeleitet [39].

Für die innere virtuelle Arbeit gilt:

$$\delta W_i = - \int_{V_e} \delta \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \boldsymbol{\sigma} \, dv = - \int_{V_e} \delta \mathbf{u}_e^T \mathbf{B}^T \underbrace{\mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{u}_e}_{\boldsymbol{\sigma}} \, dv \quad (6.51)$$

Wobei  $\mathbf{D}$  die Materialmatrix des Werkstoffes ist.  $V_e$  beschreibt das Elementvolumen.

Die *D'Alembertsche* Trägheitskraft wird bei der äußeren virtuellen Arbeit berücksichtigt. Da die Eigenschwingungen des Systems berechnet werden sollen, wird keine weitere äußere Last angesetzt.

$$\delta W_e = \int_{V_e} \underbrace{\delta \bar{\mathbf{u}}}_{\delta \mathbf{u}_e^T \mathbf{N}^T} \mathbf{p}_i \, dv \quad (6.52)$$

Die gesamte Arbeit ergibt sich zu:

$$\delta W = \delta W_i + \delta W_e = \delta \mathbf{u}_e^T \left\{ \underbrace{- \int_{V_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv}_{\mathbf{K}_e} \mathbf{u}_e - \underbrace{\int_{V_e} \rho \mathbf{N}^T \mathbf{N} dv}_{\mathbf{M}_e} \mathbf{u}_e^{\bullet\bullet} \right\} = 0 \quad (6.53)$$

Da die virtuelle Verschiebung  $\delta \mathbf{u}_e$  beliebig ist, wird Gleichung 6.53 nur dann Null, wenn der Ausdruck in den geschweiften Klammern Null ist. Damit ergibt sich die homogene Bewegungsdifferentialgleichung des Elements zu:

$$\mathbf{M}_e \mathbf{u}_e^{\bullet\bullet} + \mathbf{K}_e \mathbf{u}_e = 0 \quad (6.54)$$

Wobei  $\mathbf{K}_e$  die Steifigkeitsmatrix und  $\mathbf{M}_e$  die konsistente Massenmatrix des Elements ist.

Um die Bewegungsgleichung für das Gesamtsystem zu erhalten werden alle Freiheitsgrade des Systems in dem Verschiebungsvektor  $\mathbf{u}$  zusammengefasst. Die Elementsteifigkeits- und Massenmatrizen werden entsprechend der Anordnung der Elementfreiheitsgrade in dem Vektor  $\mathbf{u}$  zur Gesamtsteifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  bzw. zur Gesamtmassenmatrix  $\mathbf{M}$  assembliert.

$$\mathbf{M} \mathbf{u}^{\bullet\bullet} + \mathbf{K} \mathbf{u} = 0 \quad (6.55)$$

Der Produktansatz

$$\mathbf{u} = \Phi \cdot e^{i\omega t} \quad (6.56)$$

für den unbekanntem Verschiebungsvektor trennt den Ortsbereich vom Zeitbereich. Durch Einsetzen in die Bewegungsdifferentialgleichung ergibt sich folgendes homogenes Gleichungssystem, welches ein Matrixeigenwertproblem darstellt.

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \Phi = 0 \quad (6.57)$$

Eine nichttriviale Lösung existiert nur, wenn

$$\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0 \quad (6.58)$$

Gleichung 6.58 beschreibt das charakteristische Polynom der Ordnung  $n$  für  $\omega^2$  ( $n$  = Anzahl der Freiheitsgrade). Die Nullstellen dieses Polynoms (Eigenwerte) sind die Quadrate der Eigen-

kreisfrequenzen  $\omega_j$ . Die Eigenfrequenzen  $f_j$  lauten damit:

$$f_j = \frac{1}{T_j} = \frac{\omega_j}{2\pi} \quad (6.59)$$

Durch Einsetzen der Eigenwerte  $\omega_j^2$  in Gleichung 6.57 erhält man die zugehörigen Eigenvektoren  $\Phi_j$ . Diese entsprechen den Eigenformen bzw. Moden des Systems. Gleichung 6.57 beschreibt einen Satz linear abhängiger Gleichungen, d.h. für die Bestimmung der Eigenvektoren  $\Phi_j$  muss für eine Koordinate ein Wert festgelegt werden. Somit ist auch jeder beliebig skalierte Vektor  $\alpha \cdot \Phi_j$  ein Eigenvektor des Bewegungsdifferentialgleichungssystems 6.55 [39]. Eine übliche Skalierung der Eigenvektoren ist die Normierung bezüglich der Massenmatrix, so dass gilt [51]:

$$\Phi_j^T \mathbf{M} \Phi_j = 1 \quad \text{und} \quad \Phi_j^T \mathbf{K} \Phi_j = \omega_j^2 \quad (6.60)$$

## 6.4 Dimensionsanalyse [48]

Dimensionslose Kennzahlen und Ähnlichkeitsgesetze ermöglichen eine übersichtliche und allgemeingültige Darstellung naturwissenschaftlicher und technischer Gesetzmäßigkeiten, häufig auch in Form von Diagrammen. Die Methode beruht darauf, daß bei der Festlegung der Einheiten (Dimensionen) der physikalischen Größen elementare physikalische Grundgesetze benutzt werden. So spiegelt beispielsweise die Einheit der Kraft  $[\text{N}] = \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \right]$  das zweite Newtonsche Gesetz Kraft = Masse · Beschleunigung wider. In den Dimensionen sind also elementare physikalische Grundgesetze enthalten. Bei der Beschreibung naturwissenschaftlicher Sachverhalte unter Verwendung dimensionsloser Kennzahlen werden diese meist unbewusst mit verwendet [52].

In der Literatur werden verschiedene Methoden zur Herleitung der Ähnlichkeitsgesetze beschrieben, die von unterschiedlichem Aussagewert sind. Dabei muss von Fall zu Fall entschieden werden, welches Verfahren bei dem jeweils vorliegenden Problem angebracht ist. In der Mechanik findet häufig das sogenannte  $\pi$ -Theorem von Buckingham Anwendung und soll daher im folgenden näher erläutert werden. Für eine Beschreibung der anderen Verfahren sei auf Zierep [62] verwiesen.

## 6.4.1 Gewinnung dimensionsloser Kennzahlen aus Relevanzlisten

Erst die Kenntnis eines vollständigen Kennzahlensatzes ermöglicht die Klärung eines naturwissenschaftlichen Sachverhaltes. Es gibt folgende drei Möglichkeiten, komplette Sätze von Kennzahlen zu finden:

1. aus algebraischen Gleichungen
2. aus Differentialgleichungen
3. aus Relevanzlisten

Die letztgenannte Möglichkeit eignet sich besonders für komplexe Sachverhalte, die noch nicht vollständig erforscht sind, sodass weder algebraische Gleichungen noch Differentialgleichungen aufgestellt werden können. Meist besitzt man jedoch so viel Einblick in den Vorgang, dass man die physikalischen Größen angeben kann, die für den Vorgang relevant sind. Man vermutet einen Zusammenhang folgender Art:

$$f(Q_1, Q_2, Q_3, \dots) = 0 \quad (6.61)$$

Es können also nur die relevanten Größen  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$  für den jeweiligen Sachverhalt bestimmt werden, die Funktion  $f$  ist unbekannt. Die Zusammenstellung der Einflussgrößen wird als Relevanzliste bezeichnet. In der Relevanzliste sind alle physikalischen Größen aufzunehmen, gegebenenfalls auch konstante Größen wie die Erdbeschleunigung, die für den Vorgang relevant sind. Es ist möglich die Relevanzliste durch Zusammenfassen von Größen zu verkürzen, jedoch ist hierzu ein vertieftes Wissen über den jeweils vorliegenden Sachverhalt erforderlich. Untersucht man beispielsweise die Durchbiegung eines Trägers, so kann man die Erkenntnis nutzen, dass der Einfluss des Trägerquerschnitts auf die Verformung durch das Flächenmoment  $I$  erfasst werden kann. Es brauchen also nicht die Abmessungen  $L, B, H$  einzeln als geometrische Größen in die Relevanzliste aufgenommen werden.

Bei der Aufstellung der Relevanzliste ist zu beachten, dass es nicht zweckmäßig ist, lediglich zu fragen, von welchen Größen der zu klärende Sachverhalt abhängt. Vielmehr sollte man sich die Bewegungsgleichung angeschrieben denken, wenigstens soweit, dass man die Elemente angeben kann, die in sie eingehen. Es ist nicht nötig, die Gleichung im Einzelnen zu kennen, viel weniger sie zu lösen. Die Dimensionsanalyse liefert dann gewisse Aufschlüsse über den notwendigen Charakter der Lösung [8].

Mit Hilfe des  $\pi$ -Theorem ist nun zu klären, welcher Zusammenhang zwischen den Elementen der Relevanzliste besteht.

## 6.4.2 Das $\pi$ -Theorem von Buckingham

### 6.4.2.1 Potenzdarstellung der Dimensionsformeln

Jede mechanische Größe  $a$  lässt sich dimensionsmässig – angedeutet durch  $[ ]$  – als ein Potenzprodukt von Grundgrößen darstellen. Man bezeichnet solche Größen daher auch als abgeleitete Größen. In der Mechanik verwendet man als Grundgrößen im physikalischen System die Grundeinheiten Masse  $M$ , Länge  $L$  und Zeit  $T$ :

$$[a] = M^l \cdot L^m \cdot T^n \quad (6.62)$$

Nun führt die Verwendung unterschiedlicher Maßeinheiten, in denen man die Grundgrößen misst, zu unterschiedlichen Maßzahlen für eine Größe. Wählt man beispielsweise bei einer Längenmessung eine neue Längeneinheit, die halb so groß ist wie die ursprüngliche, so wird die Zahl, die einer bestimmten Länge entspricht, in der neuen Einheit doppelt so groß. Dieses Problem lässt sich jedoch einfach lösen. Hierzu ist eine aus den Grundgrößen abgeleitete Variable, z.B. das Volumen eines Würfels zu betrachten. Bildet man nun das Verhältnis zweier Würfel mit dem Volumen  $V$  und  $V^*$ , zeigt sich, dass der Zahlenwert dieses Verhältnisses von der Maßstabswahl der Grundeinheiten unabhängig ist [62].

Analytisch lässt sich die Forderung nach einer absoluten Bedeutung der abgeleiteten Größe wie folgt ausdrücken:

$$\frac{y}{y^*} = \frac{f(x_1, x_2, \dots)}{f(x_1^*, x_2^*, \dots)} = \frac{f(\alpha x_1, \beta x_2, \dots)}{f(\alpha x_1^*, \beta x_2^*, \dots)} \quad (6.63)$$

Hierin ist  $y$  bzw.  $y^*$  eine abgeleitete geometrische Größe (z.B. das Volumen  $V$  bzw.  $V^*$ ), die von den Längen  $x_1, x_2, \dots$  bzw.  $x_1^*, x_2^*, \dots$  abhängt. Die Längen  $x_1, x_2, \dots$  und  $x_1^*, x_2^*, \dots$  werden in denselben Maßeinheiten gemessen. Wird die Einheit, in der z.B.  $x_1$  gemessen wird, um den Faktor  $\frac{1}{\alpha}$  vergrößert, so ändert sich die Maßzahl von  $x_1$  um den Maßstabsfaktor  $\alpha$ .

Zur Bestimmung der unbekanntenen Funktion  $f$  führt man folgende Umformungen durch:

$$f(\alpha x_1, \beta x_2, \dots, \zeta x_n) = f(\alpha x_1^*, \beta x_2^*, \dots, \zeta x_n^*) \cdot \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \quad (6.64)$$

Nach Differenzieren von  $f$  partiell nach  $\alpha$  erhält man unter Beachtung der Kettenregel:

$$x_1 \cdot f_1(\alpha x_1, \beta x_2, \dots, \zeta x_n) = x_1^* \cdot f_1(\alpha x_1^*, \beta x_2^*, \dots, \zeta x_n^*) \cdot \frac{f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \quad (6.65)$$

Dabei bezeichne  $f_1$  die partielle Ableitung der Funktion nach dem ersten Argument. Wird nun  $\alpha, \beta, \dots$  zu eins gesetzt, ergibt sich:

$$x_1 \cdot \frac{f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)} = x_1^* \cdot \frac{f_1(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)}{f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)} \quad (6.66)$$

Das soll für alle Werte von  $x_1, x_2, \dots$  und  $x_1^*, x_2^*, \dots$  gültig bleiben. Wenn nun  $x_1^*, x_2^*, \dots$  als fest und  $x_1, x_2, \dots$  als veränderlich betrachtet werden, lässt sich kurz schreiben:

$$\begin{aligned} \frac{x}{f} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} &= k \\ \frac{\partial f}{f} &= k \cdot \frac{\partial x}{x} \end{aligned}$$

Integration ergibt:

$$f = C_1 \cdot x_1^k \quad (6.67)$$

Der Faktor  $C_1$  ist eine Funktion der übrigen Veränderlichen  $x_2, x_3, \dots$ . Führt man diese Rechnung analog für  $\beta, \gamma, \dots$  durch, erhält man schließlich als Potenzdarstellung der Dimensionsformeln

$$f = C \cdot x_1^a \cdot x_2^b \cdot x_3^c \cdot \dots, \quad (6.68)$$

worin  $a, b, c, \dots$  und  $C$  Konstanten sind [8]. Durch die Dimensionsanalyse ist es also möglich, die funktionale Gestalt physikalischer Formeln bis auf eine reellwertige Konstante  $C$  zu bestimmen, sofern nur wenige physikalische Größen Einfluss nehmen, wie beispielsweise beim erstmals von Galilei formulierten Fallgesetz:

$$s(t) = C \cdot g \cdot t^2 \quad (6.69)$$

mit  $s$  als dem Fallweg,  $g$  als der Fallbeschleunigung und  $t$  als der Zeit. Die Proportionalitätskonstante  $C$  verbleibt dabei im Experiment zu bestimmen; sie ergibt sich hier zu  $C = 0.5$ .

### 6.4.2.2 Das $\pi$ -Theorem

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass sich die Dimensionsformeln aller Größen von Potenzen der Grundeinheiten darstellen lassen. Nun stellt sich die Frage nach dem Zusammenhang zwischen den verschiedenen physikalischen Größen, von denen der zu untersuchende Sachverhalt abhängt.

Gegeben seien  $n$  physikalische, dimensionsbehaftete Größen:  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  zwischen denen folgender Zusammenhang besteht:

$$f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = 0 \quad (6.70)$$

Ferner bilden  $A_1, A_2, \dots, A_m$  eine Basis aus  $m \leq n$  dimensionsbehafteten Größen. Kennzeichnend für die Basisgrößen ist, dass sich keine durch ein Potenzprodukt der übrigen darstellen lässt. In der Mechanik bildet beispielsweise das Tripel (Masse, Länge, Zeit)  $M, L, T$  eine Basis. Gemäß dem im letzten Abschnitt bewiesenen Satz sind die  $[Q_k]$  durch Potenzprodukte der  $A_k$  darstellbar, also

$$\begin{aligned} [Q_1] &= A_1^{a_{11}} \cdot A_2^{a_{21}} \cdot \dots \cdot A_m^{a_{m1}} \\ &\vdots \\ [Q_n] &= A_1^{a_{1n}} \cdot A_2^{a_{2n}} \cdot \dots \cdot A_m^{a_{mn}} \end{aligned} \quad (6.71)$$

Gesucht seien nun alle unabhängigen Potenzprodukte der abgeleiteten Größen, die dimensionslos in ihren Grundeinheiten sind

$$\pi = Q_1^{k_1} \cdot Q_2^{k_2} \cdot \dots \cdot Q_n^{k_n} \quad (6.72)$$

Geht man in Gleichung 6.72 zu den Dimensionen über und berücksichtigt Gleichung 6.71, so wird

$$[\pi] = A_1^0 \cdot \dots \cdot A_m^0 = \{A_1^{a_{11}} \cdot \dots \cdot A_m^{a_{m1}}\}^{k_1} \cdot \dots \cdot \{A_1^{a_{1n}} \cdot \dots \cdot A_m^{a_{mn}}\}^{k_n} \quad (6.73)$$

Ein Vergleich der Exponenten der Basisgrößen in Gleichung 6.73 ergibt ein homogenes, lineares Gleichungssystem von  $m$  Gleichungen für die Unbekannten  $k_1, k_2, \dots, k_n$ .

$$\begin{aligned} a_{11}k_1 + a_{12}k_2 + \dots + a_{1n}k_n &= 0 \\ a_{21}k_1 + a_{22}k_2 + \dots + a_{2n}k_n &= 0 \\ \vdots & \\ a_{m1}k_1 + a_{m2}k_2 + \dots + a_{mn}k_n &= 0 \end{aligned} \tag{6.74}$$

Das Gleichungssystem lässt sich auch in Matrizenform schreiben:

$$\begin{array}{c|cccc} & Q_1 & Q_2 & \cdots & Q_n \\ \hline A_1 & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ A_2 & a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_m & a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{array} \tag{6.75}$$

Diese  $m \times n$ -Matrix besitzt  $m$  Zeilen und  $n$  Spalten wobei die  $k$ -te Spalte die Einheit von  $Q_k$  angibt. Sie wird daher auch als die Dimensionsmatrix der  $n$  Größen bezeichnet. Damit ist die Frage nach der Existenz und der Vielfältigkeit dimensionsloser Potenzprodukte zurückgeführt auf die Frage nach der Lösbarkeit bzw. nach der Gesamtheit von Lösungen des linearen homogenen Gleichungssystems. Aus der linearen Algebra ist bekannt, dass ein homogenes, lineares Gleichungssystem mit  $n$  Unbekannten, dessen Koeffizienten-Matrix den Rang  $r$  hat, genau  $n$  linear unabhängige Lösungen besitzt. Im Sonderfall  $n = r$  lässt sich keine dimensionslose Kennzahl angeben, da das Gleichungssystem nur trivial gelöst werden kann. Angewandt auf das Grundproblem der Dimensionsanalyse besagt dies [62]:

### $\pi$ -Theorem von Buckingham

*Es seien  $m$  unabhängige Grundgrößen  $A_1, A_2, \dots, A_n$  und  $n$  physikalische Größen  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  gegeben, deren Dimensionsmatrix den Rang  $r$  hat. Dann kann man genau  $n - r$  dimensionslose unabhängige Kombinationen  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}$  bilden. Ein physikalisches Gesetz der Form  $f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = 0$  lässt sich äquivalent dazu in der Form  $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-r}) = 0$  schreiben.*

Zur Ermittlung der  $\pi$ -Zahlen stellt man zunächst die Dimensionsmatrix auf und ermittelt den Rang  $r$  der Matrix mittels Äquivalentumformungen. Dazu zählen

1. Vertauschen von Zeilen (Spalten) untereinander
2. Multiplikation von Zeilen (Spalten) mit konstanten Faktoren
3. Addition (bzw. Subtraktion) von Zeilen (Spalten) zu anderen Zeilen (Spalten)

Dieses Vorgehen ist auch als „Gaußscher Algorithmus“ bekannt und überführt die Dimensionsmatrix in die normierte Form mit  $r \times r$ -Einheitsmatrix und  $(n - r) \times r$ -Restmatrix:

$$\begin{array}{c|ccc|ccc}
 & Q_{i=1} & Q_i & Q_{i=r} & Q_{i=r+1} & Q_k & Q_{n-r} \\
 \hline
 A_1 & 1 & 0 & 0 & a_{1r+1} & a_{1k} & a_{1n-r} \\
 A_i & 0 & 1 & 0 & a_{ir+1} & a_{ik} & a_{in-r} \\
 A_r & 0 & 0 & 1 & a_{rr+1} & a_{rk} & a_{rn-r}
 \end{array} \tag{6.76}$$

Hierin sind die ersten  $r$  Spalten und somit die Größen  $Q_1, Q_i, \dots, Q_r$  linear unabhängig, d.h. die einzige dimensionslose Kombination der Größen ist die triviale Kombination

$$\prod_{i=1}^r [Q_i]^{k_i} = 1 \quad \text{genau dann, wenn} \quad k_1, k_i, \dots, k_r = 0 \tag{6.77}$$

Die Größe  $Q_k$  entspricht der  $k$ -ten Spalte der Dimensionsmatrix. Für  $k > r$  ist diese eine Linearkombination der ersten  $r$  linear unabhängigen Spalten. Es kann also  $[Q_k]$  durch die Einheiten  $[Q_1], [Q_i], \dots, [Q_r]$  ausgedrückt werden.

$$[Q_k] = [Q_1]^{a_{1k}} \cdot [Q_i]^{a_{ik}} \cdot \dots \cdot [Q_r]^{a_{rk}} \tag{6.78}$$

Die zugehörige dimensionslose Kennzahl ergibt sich damit zu [53]:

$$\pi_k = \frac{Q_k}{Q_1^{a_{1k}} \cdot Q_i^{a_{ik}} \cdot \dots \cdot Q_r^{a_{rk}}} \quad \text{mit} \quad [\pi_k] = 1 \tag{6.79}$$

Die  $n - r$  Kennzahlen berechnen sich gemäß obiger Gleichung aus dem Quotienten der Größen über der Restmatrix  $Q_k$  und dem zugehörigen Potenzprodukt der Größen  $Q_i$  über der Einheitsmatrix. Die Größen  $Q_i$  sind somit in jeder Kennzahl enthalten, während die Größen  $Q_k$  nur in einer einzigen auftauchen. Durch eine Änderung der Anordnung der Größen in der Relevanzliste erhält man somit unterschiedliche Sätze an dimensionslosen Kennzahlen.



### 6.4.2.3 Freie und gebundene Größen

Der Rang  $r$  der Dimensionsmatrix gibt die Anzahl der Freiheitsgrade des zu lösenden Gleichungssystems an. Aus der Relevanzliste können also  $r$  der insgesamt  $n$  Größen frei gewählt werden. Diese Wahlfreiheit besteht zum einen in der Auswahl der Größe und zum anderen in der Festlegung des Wertes dieser Größen. Die Parameter der Relevanzliste lassen sich somit unterteilen in  $r$  freie Größen, deren Werte im Versuch frei wählbar sind, und in  $n - r$  gebundene Größen. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht mit jeder beliebigen Kombination von  $r$  Größen der Relevanzliste eine Einheitsmatrix mit dem Höchststrang  $r$  gebildet werden kann. Die Größen sind so zu wählen, dass ihre Einheiten linear voneinander unabhängig sind, d.h. der Rang der Dimensionsmatrix der freien Größen muss gleich dem Rang der Dimensionsmatrix aller Größen sein. Beispielsweise kann nur eine Länge festgelegt werden, alle weiteren geometrischen Abmessungen in der Relevanzliste sind gebundene Größen. In der Dimensionsmatrix sind die Parameter so anzuordnen, dass die gebundenen Größen die Restmatrix bilden, so dass sie jeweils nur in einer Kennzahl enthalten sind. Die Einheitsmatrix umfasst die freien Größen, die zur Erzeugung der Einheitenfreiheit als Potenzprodukt in jeder der Zahlen auftauchen.



## 7 Entwicklung der numerischen Modelle

Parallel zur experimentellen Untersuchung in Kapitel 4 werden numerische Simulationen durchgeführt. Dazu werden Finite-Elemente-Modelle erstellt, die anhand der experimentellen Ergebnisse kalibriert werden. Darüber hinaus werden geeignete Auswertemodelle entwickelt, um die vibroakustischen Eigenschaften zu beschreiben. Das Ziel der Modellierung besteht in der Durchführung von Parameterstudien, was eine Interaktionsfähigkeit zwischen den einzelnen Modellen, sowie eine vollständige Parametrisierung erfordern. Für diese numerischen Simulationen wird das kommerzielle Finite-Elemente-Software Ansys Classic der Firma CADFEM eingesetzt. Obwohl mit Ansys Workbench ein neueres System zur Verfügung steht, wird die klassische Benutzeroberfläche bevorzugt, da hier vor allem die Anforderungen an die Parametrisierbarkeit und die Automatisierung über die programminterne Skriptsprache Ansys Parametric Design Language (APDL) gegeben sind. Zur Erstellung der Auswertemodelle wird die Software MATLAB<sup>®</sup> der Firma *The MathWorks* verwendet.

### 7.1 Beschreibung der Analyse

Zur numerischen Simulation findet die Finite Elemente Methode (FEM) Anwendung. Eine detaillierte Beschreibung der Methode liefern unter anderem Müller und Groth [41] und Stelzmann u. a. [51]. Eine solche Simulation lässt sich generell in den drei Prozessschritten Eingabe (Preprocessor), Verarbeitung (Solution Processor) und Ausgabe (Postprocessor) beschreiben, die wiederum jeweils aus mehreren Einzelschritten aufgebaut werden. Da die Strukturmodelle in mehreren Ausbauständen, unter verschiedenen Belastungen und mit unterschiedlichen Analysetypen und Auswerteverfahren untersucht werden, wird ein modularer Ansatz für die Programmierung gewählt, der gleichzeitig eine Automatisierung zur Durchführung von Parameterstudien ermöglicht.

## 7.1.1 Prozessschritte der Simulationen

In Abbildung 7.1 ist der Aufbau der dynamischen Analysen schematisch dargestellt. Die einzelnen Prozessschritte werden im Folgenden beschrieben.

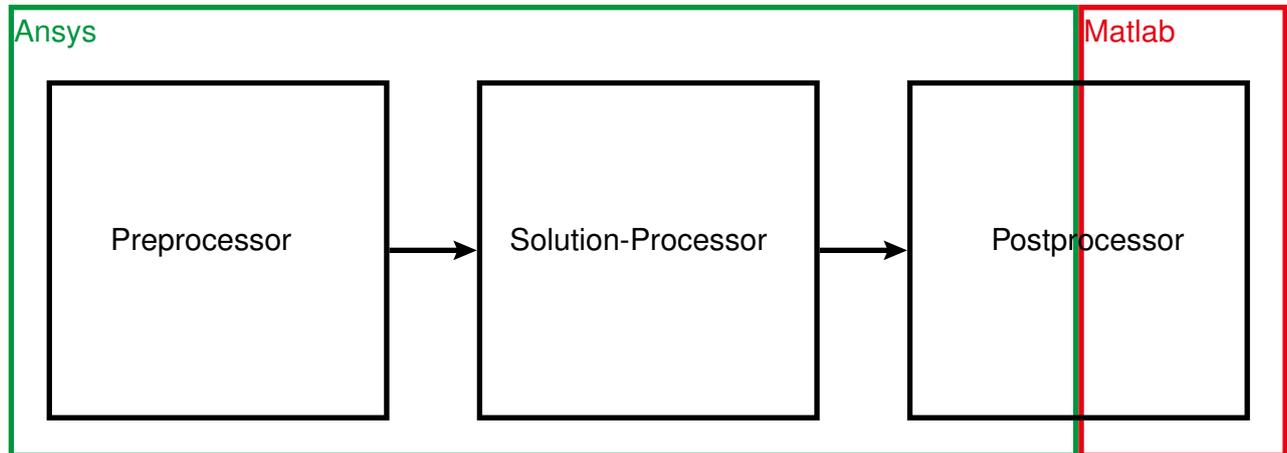


Abbildung 7.1: EVA-Schema der FE-Simulation

### 7.1.1.1 Preprocessor

Im ersten Prozessschritt, dem Preprocessor, werden folgende Einzelschritte durchgeführt:

- Erstellung der Systemgeometrie
- Zuweisung der Elementtypen und Materialdaten
- Generierung des Finite-Elemente-Netzes
- Aufbringung der Randbedingungen

Vor dem Hintergrund der Grundvoraussetzung einer vollständigen Parametrisierbarkeit scheidet ein Import einer Systemgeometrie, die mithilfe einer externen CAD-Software generiert und importiert wird, aus. Trotz des höheren Arbeitsaufwandes werden die Systemgeometrien ebenfalls in APDL programmiert.

### 7.1.1.2 Solutionprocessor

Im Solution Processor erfolgt die:

- Aufbringung der Lasten
- Definition des zu untersuchenden Zeit- oder Frequenzbereiches
- Wahl der Analysetypen und -optionen
- Lösung der Gleichungssysteme

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden unterschiedliche dynamische Analysen durchgeführt. Mithilfe von Modalanalysen werden Eigenfrequenzen und Eigenformen ermittelt, welche sowohl zur Charakterisierung der Modelle als auch für nachfolgende Analysen verwendet werden.

**Modalanalyse - harmonische Analyse** Zur Beschreibung des Schwingverhaltens werden über numerische Modelle harmonische Analysen durchgeführt, anhand derer die Frequenzgänge bei gegebener Belastung in einem festgelegten Frequenzbereich in den gewünschten Auswertepositionen ermittelt werden. Bei dieser Analyseart wird - soweit möglich - eine modale Superposition zuvor ermittelter Moden vorgenommen, um den Rechenaufwand zu minimieren. Wo dies nicht möglich ist, beispielsweise bei der Verwendung von Elementen mit unsymmetrischen Matrizen (vgl. Kapitel 7.2.6), muss eine vollständige Lösung der Systemmatrizen durchgeführt werden.

In den Berechnungen werden als Anregungen dabei entweder Einzellasten oder stochastisch verteilte Flächenlasten angesetzt (s. Kapitel 7.3.2.3). Einzellasten regen abhängig von deren Positionierung, bestimmte Eigenschwingformen besonders stark bis nicht an. Bei der stochastischen Flächenlast werden demgegenüber sämtliche Moden in nahezu gleichem Maße angeregt. Dazu sind jedoch Mittlungen über mehrere Rechendurchläufe erforderlich, was gegenüber den Einzellasten zu einem stark erhöhten Rechenaufwand führt. Alternativ bietet sich eine Auswertung mehrerer Einzellasten an ausgewählten Positionen an.

**Direkte Lösung - Transiente Analyse** Zur Simulation einer gehenden Person werden die Strukturmodelle durch transiente Lasten beaufschlagt, deren zeitliche Verläufe an experimentell ermittelte Kraftverläufe angepasst werden (s. Kapitel 7.3.3.1). Dazu werden transiente Analysen basierend auf dem Newmark-Beta Zeitschritt-Verfahren durchgeführt. Zusammenfassend sind die beiden Analyseoptionen im folgenden dargestellt:

- Modalanalyse
- Harmonische Analyse
  - Frequenzbereich/ Frequenzauflösung
  - Lasten:
    - Einzellasten
    - stochastische Flächenlasten
  - Analyseoptionen
    - vollständige Lösung der Systemmatrizen
    - modale Superposition
- Transiente Analyse
  - Lasten:
    - Dauer/ Zeitschritt
    - Transiente Lasten (Geher)

### 7.1.1.3 Postprocessor

Im Postprocessor werden die Ergebnisse der Berechnungen ausgewertet. Ansys Classic bietet hierbei bereits implementierte Möglichkeiten, die Ergebnisse der einzelnen Analysen tabellarisch sowie graphisch darzustellen und zur Weiterverarbeitung zu exportieren (s. Kapitel 7.3.2.4), eine Auswertung unter akustischen Gesichtspunkten ist jedoch nicht direkt möglich. Zur Ermittlung des vibroakustischen Verhaltens wird ein auf den Frequenzgängen der Verformung basierendes semi-analytisches Auswertemodell in Matlab verwendet (s. Kapitel 7.4.1). Zur Automatisierung wird im APDL-Code eine Fortran basierte Schnittstelle implementiert, welche die Verformungsdaten an MATLAB<sup>®</sup> übergibt.

## 7.1.2 Modularer Aufbau

Die Untersuchungen werden anhand von drei Hauptstrukturen in jeweils vier unterschiedlichen Ausbauzuständen durchgeführt. Dies macht, wie in Tabelle 7.1 ersichtlich, in Kombination mit den verschiedenen Lastfällen und Analysetypen eine große Anzahl an FE-Modellen erforderlich. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird ein modularer Ansatz für die Erstellung der Modelle gewählt (s. Abb. 7.2). So kann für jeden Ausbauzustand exakt die selbe Hauptstruktur (z.B. eine Holzbalkendecke) verwendet werden. Eine Änderung im Code wirkt sich somit immer auf alle Rechenmodelle gleichermaßen aus. Auch die Nebenstrukturen (z.B. der Estrich) und deren Schnittstellen zu den unterschiedlichen Hauptstrukturen werden so ausgelegt, dass diese ohne Änderungen im Code zu jeder Hauptstruktur hinzugeladen werden können. Dabei wird gleichzeitig sichergestellt, dass die Lasteinleitung im Solution-Processor und die Auswertung im Postprocessor an die geänderten Geometrien angepasst wird. Dieser modulare Aufbau ist darüber hinaus Voraussetzung für einen automatisierten Ablauf der vorgesehenen Parameterstudien.

**Tabelle 7.1:** Übersicht über die untersuchten Kombinationen

|            | Brettsperrholzdecke (BSD) |   |   |   | Holzbalkendecke (HBD) |   |   |   | Hohlkastendecke (HKD) |     |     |     |
|------------|---------------------------|---|---|---|-----------------------|---|---|---|-----------------------|-----|-----|-----|
| Rohdecke   | X                         | X | X | X | X                     | X | X | X | X                     | (X) | (X) | (X) |
| Estrich    |                           | X |   | X |                       | X |   | X |                       | (X) |     | (X) |
| Unterdecke |                           |   | X | X |                       |   | X | X |                       |     | (X) | (X) |
|            | Modalanalyse              |   |   |   |                       |   |   |   |                       |     |     |     |
|            | Harmonische Analyse       |   |   |   |                       |   |   |   | Einzellast            |     |     |     |
|            | Stochastische Flächenlast |   |   |   |                       |   |   |   |                       |     |     |     |
|            | Transiente Analyse        |   |   |   |                       |   |   |   |                       |     |     |     |

Analog zu dem in Abschnitt 7.1.1 vorgestellten Schema lassen sich die Module in die Klassen einteilen, die weitgehend den einzelnen Prozessschritten der FE-Simulation entsprechen zuordnen. Im Gegensatz zu den Einzelschritten im Preprozessor werden die Module dieser Klasse nach Strukturelementen eingeteilt, die jeweils sämtliche benötigten Einzelschritte umfassen, um selbstständige für sich abgeschlossene Einheiten zu bilden. Etwaig auftretende Fehler bei der Berechnung können so schneller geortet und behoben werden. Eine Ausnahme bilden hierbei die Randbedingungen der Hauptstruktur. Um ein breites Spektrum an Auflagerbedingungen abbilden zu können, werden hier eigene Module mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad entwickelt (s. Kapitel 7.2.7). Die zweite Klasse umfasst die Analysen im Solutionprozessor sowie die

Schnittstellen zu MATLAB<sup>®</sup>. Die Eingabe der Parameter wird für jedes Modul in ein weiteres Untermodul ausgelagert. Dies dient zum Einen der Übersichtlichkeit, zum Anderen der Robustheit, da somit bei Änderungen der Parameter, sei es manuell oder automatisch im Rahmen einer Parameterstudie nicht auf das Hauptmodul zugegriffen werden muss. Die Zusammensetzung der Module für die Berechnungen erfolgt über eine Hauptdatei, die als Eingabedatei direkt in die Kommandozeile der grafischen Benutzeroberfläche von ANSYS<sup>®</sup> eingegeben, aber auch im Hintergrund ausgeführt werden kann. Über die Hauptdatei werden darüber hinaus modulübergreifende Parameter (Länge, Breite, usw.) gesteuert. Die einzelnen Module werden in den Abschnitten 7.2 und 7.3 näher erklärt. Im letzten Abschnitt 7.4 werden die Auswertemodelle in MATLAB<sup>®</sup> erörtert.

### 7.1.3 Parametrisierung

Um die größtmögliche Flexibilität der FE-Modelle sicherzustellen werden die einzelnen Module vollständig parametrisiert. Die Parameter der FE-Simulationen lassen sich nach Verwendungszweck in drei Typen einteilen.

#### 7.1.3.1 Geometrieparameter

Die Geometrieparameter hängen in erster Linie von der Teststruktur ab, mit deren experimentell ermittelten Daten die Simulationsergebnisse verglichen werden sollen. Diese lassen sich wiederum in modulspezifische (z.B. Balkenbreite) und modulübergreifende Parameter (z.B. Länge) einteilen. Änderungen der modulspezifischen Parameter haben dabei lediglich Auswirkungen auf die jeweilige Modulgeometrie, wohingegen die modulübergreifenden Parameter das Gesamtsystem beeinflussen. Im Zuge der Parameterstudien werden die Parameter diesen Typs variiert.

#### 7.1.3.2 Material-Parameter

Die Anzahl der Materialparameter hängt von dem jeweiligen Materialmodell und dem Finite-Element-Typ ab. Bei homogenen Bauteilen können für die eingesetzten Materialien die Werte aus der Norm übernommen werden, bzw. bei Ersatzmodellen daraus abgeleitet werden. Wo experimentelle Voruntersuchungen möglich sind, können die daraus ermittelten Werte verwendet

werden. Bei inhomogenen Bauteilen muss dabei ein Model-Updating durchgeführt werden (s. Kapitel 8.2.2). Diese Parameter werden vorab festgelegt und sind nicht Teil der Parameterstudien.

### 7.1.3.3 Modell-Parameter

Über die Modell-Parameter lässt sich die Diskretisierung und somit der Rechenaufwand für die jeweiligen Modelle beeinflussen. Zu diesem Parametertyp zählen:

- Elementgröße
- Anzahl der auszuwertenden Moden
- Frequenzbereich und Frequenzauflösung der harmonischen Analyse
- Gesamtdauer und Zeitschrittgröße der transienten Analyse

Diese Parameter werden an die gegebene Aufgabenstellung angepasst.

## 7.2 Strukturmodelle

Im Preprocessor werden die Strukturmodelle für die Simulationen generiert. Diese setzen sich aus den Modulen für die drei zu untersuchenden Deckentypen

- Brettsperrholzdecke (BSD)
- Holzbalkendecke (HBD)
- Hohlkastendecke (HKD)

den zusätzlichen Aufbauten

- Estrich (TE, FE)
- abgehängte Unterdecke (UD)

und den Modulen für die unterschiedlichen Auflagerbedingungen zusammen. In Abbildung 7.2 ist die Erstellung der Strukturmodelle schematisch dargestellt.

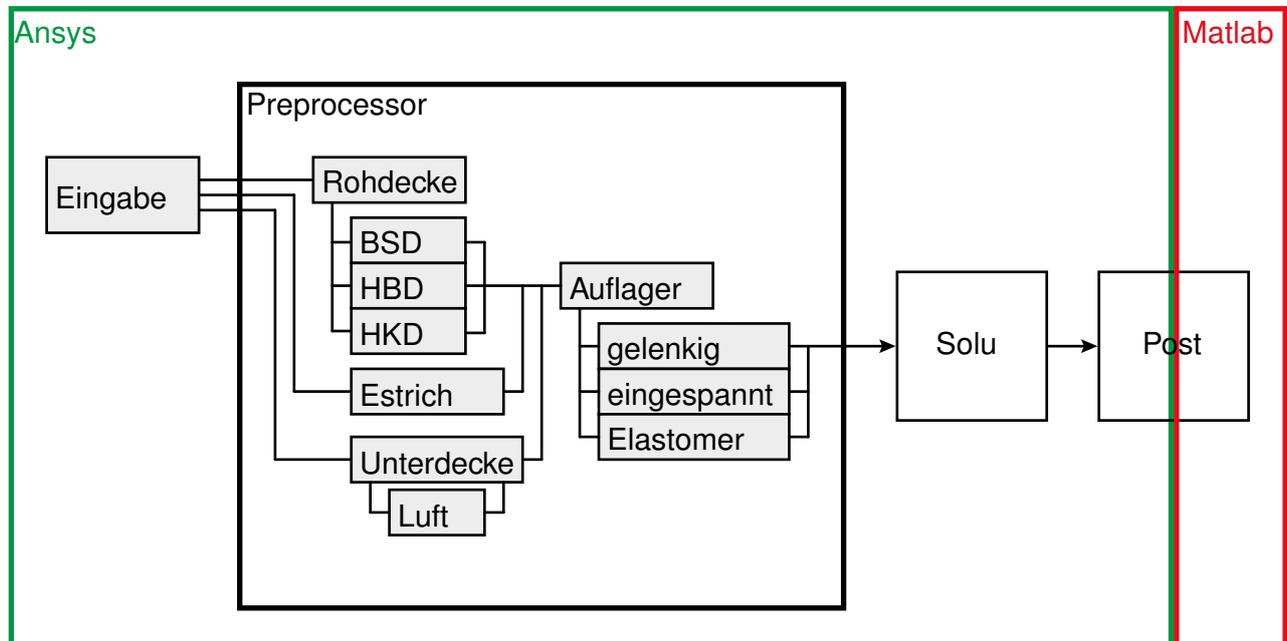


Abbildung 7.2: Modularer Aufbau im Preprocessor

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Module erläutert.

## 7.2.1 Gemeinsamkeiten aller angesetzten Modelle

Einige Einflussgrößen und Parameter gelten für alle Strukturmodelle gleichermaßen und werden daher an dieser Stelle vorab aufgeführt.

### 7.2.1.1 Idealisierung

Die Deckensysteme werden als Linien-gelagerte ebene Platten mit rechteckiger Geometrie idealisiert dargestellt. Je nach Auflagersituation handelt es sich bei dem statischen System um eine zweiseitig gelagerte einachsig gespannte oder eine allseitig gelagerte zweiachsig gespannte Platte. Alle Deckensysteme besitzen eine Haupttragrichtung mit einer über die Länge homogenen Steifigkeitsverteilung. Die dazu orthogonale Tragrichtung besitzt eine deutlich geringere

Steifigkeit und einen inhomogenen Aufbau (z.B. bedingt durch die Balken der Holzbalkendecke).

Das globale Koordinatensystem wird so gewählt, dass die globale  $x$ -Achse in Haupt-, die globale  $y$ -Achse in Nebentragsrichtung zeigt. Die globale  $z$ -Achse zeigt normal zur Platte nach oben. Der Ursprung des Koordinatensystems wird in die linke untere Ecke der jeweiligen Hauptgeometrie gelegt.

### 7.2.1.2 Diskretisierung

Es wird eine Kantenlänge der Elemente von  $e_{size} = 0.1$  m ausgewählt. Die Konvergenzstudie in Kapitel 8.2.1 zeigt, dass diese ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Das maximale Kantenlängenverhältnis überschreitet in keinem Strukturmodell die in Müller und Groth [41] genannte Grenze von 1 : 10.

### 7.2.1.3 Parameter

Modulübergreifende Parameter sind Länge und Gesamtbreite des Deckensystems. Diese werden im Eingabemodul definiert. Bei der Modellierung der Teststruktur werden diese durch die Abmessungen des Deckenprüfstandes in Rosenheim vorgegeben.

**Tabelle 7.2:** Modulübergreifende Parameter

| Parameter                        | Variable   | Wert | Einheit |
|----------------------------------|------------|------|---------|
| Länge                            | $l$        | 5.50 | [m]     |
| Gesamtbreite                     | $w_{tot}$  | 5.50 | [m]     |
| Kantenlänge der finiten Elemente | $e_{size}$ | 0.1  | [m]     |

## 7.2.2 Brettsperrholzdecke

Die in Kapitel 2.1.1 beschriebene Brettsperrholzdecke besteht aus in Längsrichtung linienförmig verbundenen Plattenstreifen, die einen mehrschichtigen Aufbau aufweisen. Bei den einzelnen

Schichten handelt es sich um kreuzweise verleimte Fichtenbretter, wobei diese nur vertikal verleimt und in horizontaler Richtung stumpf gestoßen sind. Abhängig vom Typ der Brettsperrholzdecke variiert im Falle des hier betrachteten Portfolios des Herstellers Züblin Merk die Anzahl der Schichten zwischen 3 und 9, wobei drei Brettstärken (0.017 m, 0.027 m und 0.033 m ) zum Einsatz kommen. Die Verbindung der einzelnen Plattenstreifen wird über eingelassene und verschraubte Furnierschichtholz Streifen realisiert.



**Abbildung 7.3:** Brettsperrholz

### 7.2.2.1 Idealisierung

Für die Modellierung dieser Struktur werden Idealisierungen vorgenommen. Die einzelnen Bretter und deren Schnittmuster werden vernachlässigt und zu einem einzigen Volumenkörper je Schicht zusammengefasst. Zwischen den einzelnen Schichten wird unter Vernachlässigung der Nachgiebigkeit der Leimschicht ein starrer Verbund angenommen. Bei der Kopplung der Plattenstreifen werden zur Modellierung der Kertostreifen elastische Federn eingesetzt (s. Abb. 7.6). Die aus den Idealisierungen entstehenden Unsicherheiten im Modell werden über angepasste Materialparameter ausgeglichen.

### 7.2.2.2 Diskretisierung

Zur Diskretisierung der Volumenkörper werden 3D-Volumenelemente verwendet. Aufgrund der quaderförmigen Struktur der Volumina ist es möglich, ein strukturiertes Netz aus hexaederförmigen Elementen zu generieren [41]. In ANSYS® stehen mehrere 3D-Volumenelemente zur Verfügung, die sich in der Anzahl der Knoten je Element und des Polynom-Grads der Ansatzfunktionen unterscheiden. Der Vergleich mehrerer Elementarten ergibt, dass das acht-knotige

SOLID185-Element adäquate Ergebnisse liefert. Weiterhin zeigt die Konvergenzstudie in 8.2.1, dass die Verwendung von einer Elementlage pro Schicht in vertikaler Richtung hinsichtlich der Ergebnisqualität ausreicht. Die in 7.2.1 vorgegebene Kantenlänge der Elemente kann aufgrund der unterschiedlichen Breite der Einzelplatten in  $y$ -Richtung nicht konsequent eingehalten werden, wodurch sich hier auch kleinere Werte einstellen. Diese müssen in der Modellierung der Module der Nebenstrukturen (z.B. der Unterdecke) berücksichtigt werden. Zur Realisierung der starren Verbindung der einzelnen Schichten untereinander sind keine zusätzlichen Maßnahmen notwendig. Da sich die jeweiligen Volumenkörper dieselbe Begrenzungsfläche teilen, besitzen auch die generierten Volumenelemente an der Schichtgrenze koinzidente Knoten.

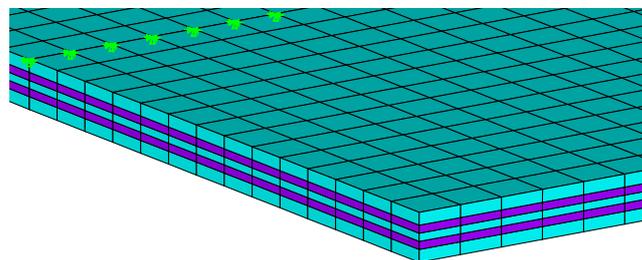


Abbildung 7.4: FE Ausschnitt BSD

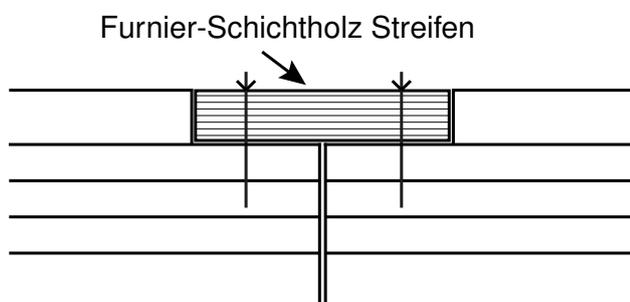


Abbildung 7.5: Skizze Kertostreifen

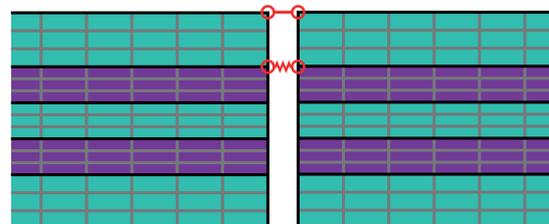


Abbildung 7.6: FE Modell Plattenverbindung

Zur Modellierung der Verbindung der einzelnen Plattenstreifen wird jeweils die oberste Schicht benachbarter Elemente gekoppelt. Aufgrund der fehlenden Rotationsfreiheitsgrade der Volumenelemente ist eine Kopplung über 1D-Torsionsfederelemente nicht direkt möglich. Gelöst wird dies durch eine Kopplung der Verschiebungsfreiheitsgrade der Knoten in den Grenzflächen der Elemente. Deren obere Knoten werden dabei vollständig gelenkig gekoppelt, wohingegen die unteren Knoten in Plattenlängsrichtung über 1D-Federelemente verbunden werden. Dadurch

wird eine Verbindung geschaffen, deren Grad der Rotationsbehinderung über die Federsteifigkeit des Federelementes einstellbar ist. In ANSYS<sup>®</sup> stehen dazu COMBIN14-Elemente zur Verfügung.

**Das SOLID185 Element** ist ein acht-knotiges Volumenelement. Jeder Knoten hat als Freiheitsgrade die Verschiebungen in die Koordinatenrichtungen  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Es werden für die Verschiebungen trilineare Ansatzfunktionen verwendet [41]. Solche Elemente sind ohne Gegenmaßnahmen anfällig für verschiedene Versteifungseffekte (Locking-Effekte). Um diese Effekte auszuschließen stehen für das SOLID185 Element in ANSYS<sup>®</sup> vier verschiedene Optionen zur Verfügung. Um eine Schubversteifung (engl. shear locking) zu vermeiden wird hier die „Simplified Enhanced Strain Formulation“ verwendet. Bei dieser Methode werden - im Gegensatz zur Enhanced Strain Formulation - lediglich die internen Freiheitsgrade zur Vermeidung einer Schubversteifung eingeführt [4].

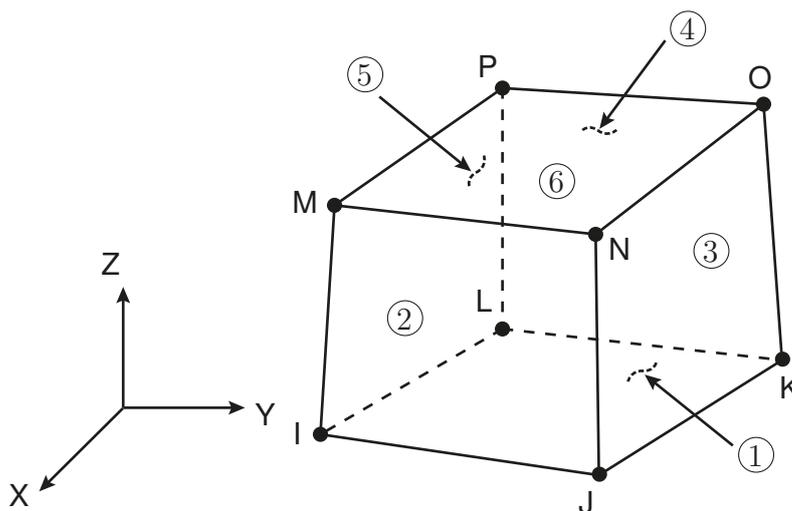


Abbildung 7.7: SOLID185-Element [4]

**Das COMBIN14-Element** ist ein eindimensionales Feder-Dämpfer Element für ein-, zwei- oder dreidimensionale Anwendungen. Es kann entweder als Längs- oder als Torsionfeder ausgebildet werden. Es besitzt keine Masse und kann nicht auf Biegung beansprucht werden. Es wird durch zwei Knoten mit bis zu drei Freiheitsgraden festgelegt. Als Längsfeder besitzt das Element nur Verschiebungsfreiheitsgrade und leistet keinen Widerstand gegen Torsionbeanspruchungen. Im Falle der Torsionfeder werden dagegen keine Längslasten übertragen, da die Knoten nur über

Rotationsfreiheitsgrade verfügen. Die Federsteifigkeit wird über die Federkonstante  $k$  in  $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$  bzw.  $\left[\frac{\text{Nm}}{\text{rad}}\right]$  die Dämpfungskonstante über die Konstante  $C_v$  in  $\left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}}\right]$  bzw.  $\left[\frac{\text{Nms}}{\text{rad}}\right]$  eingegeben.

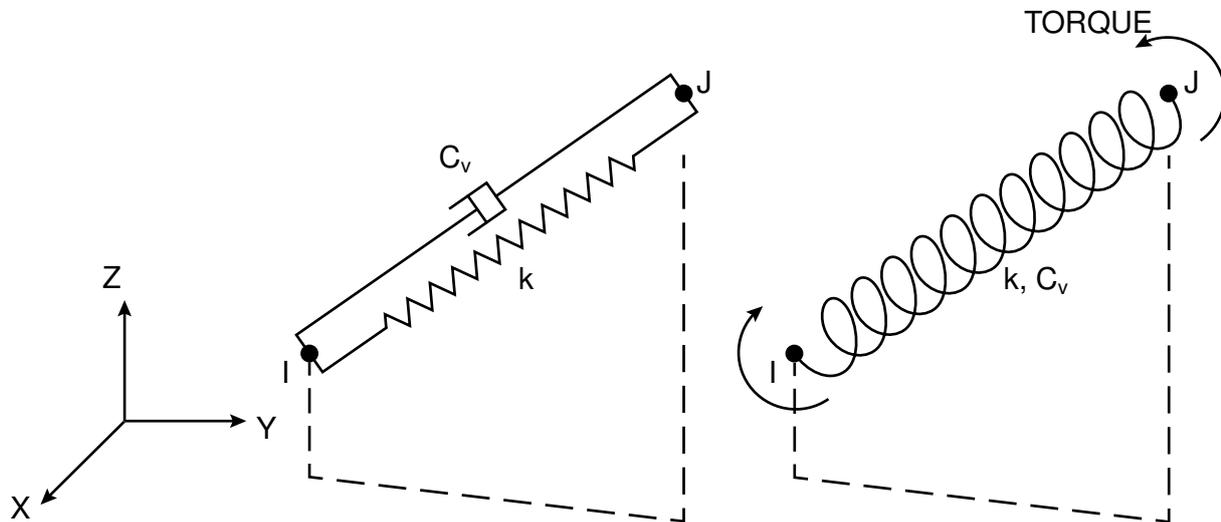


Abbildung 7.8: COMBIN14-Element [4]

### 7.2.2.3 Parameter

Der Schichtaufbau lässt sich über den Parameter BSD-Typ  $t_{\text{BSD}}$  festlegen. Er entspricht der Gesamtdicke des jeweiligen Querschnitts und ist damit eindeutig definierbar. Über diesen lassen sich aus einer Datenbank [36], welche die Abmessungen sämtlicher, bei Züblin Merk verfügbarer Querschnitte enthält, die Anzahl der Schichten und die jeweiligen Schichtdicken auslesen. Mit diesen Daten wird zunächst nur ein Plattenstreifen generiert, dessen Breite sich aus der Gesamtbreite und der Anzahl der Plattenstreifen ergibt. Dieser wird anschließend entsprechend oft kopiert.

Zum Abgleich mit den gemessenen Daten aus Kapitel 4 werden die fünf- bzw. sechs-schichtigen BSD-Typen Leno105 und Leno162 modelliert. Die jeweiligen Querschnittabmessungen sind in Tabelle 7.3 aufgelistet.

**Tabelle 7.3:** Querschnittabmessungen der BSD-Typen 105 und 162

| Schicht | BSD-Typ   |             |           |             |
|---------|-----------|-------------|-----------|-------------|
|         | 105       |             | 162       |             |
|         | Dicke [m] | Ausrichtung | Dicke [m] | Ausrichtung |
| 1       | 0.027     |             | 0.027     |             |
| 2       | 0.017     | ⊥           | 0.027     | ⊥           |
| 3       | 0.027     |             | 0.027     |             |
| 4       | 0.017     | ⊥           | 0.027     |             |
| 5       | 0.027     |             | 0.027     | ⊥           |
| 6       | —         | —           | 0.027     |             |

Die Bretter bestehen aus Fichtenholz. Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, handelt es sich dabei um einen transversal isotropen Baustoff, der in diesem Fall durch ein orthotropes Materialmodell abgebildet wird. Die Materialparameter können aufgrund der Idealisierungen nicht direkt aus der Literatur übernommen werden, sondern werden durch Model-Updating unter Verwendung experimentell ermittelter Daten hergeleitet. Der Ablauf dieses Model-Updateings wird in Kapitel 8.2.2 erläutert. Die Dichte des Fichtenholzes wird im Falle der BSD über Wiegen der Plattenstreifen ermittelt.

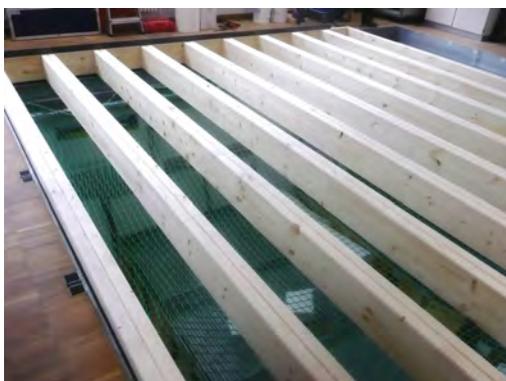
In Tabelle 7.4 sind die Parameter des BSD-Moduls und deren Werte für die Modellierung der getesteten Strukturen aufgelistet. Bei den Bezeichnungen der Variablen in den Tabellen 7.4 ff. handelt es sich um interne Bezeichnungen zur konkludenten Umsetzung im Rahmen der Impellentierung des Codes.

**Tabelle 7.4:** Parameter BSD-Modul

| Parameter                     | Variable                             | Wert               | Einheit                                     |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------|---|
| Anzahl Plattenstreifen        | $n$                                  | 4                  | [–]   |
| BSD-Typ                       | $t_{\text{BSD}}$                     | 105 / 162          | [–]   |
| Dichte                        | $\rho_{\text{spr,m}}$                | 470                | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| E-Modul in X-Richtung         | $E_{\parallel,\text{spr,mu}}$        | $10981 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| E-Modul in Y-Richtung         | $E_{\perp,\text{spr,mu}}$            | $137 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| E-Modul in Z-Richtung         | $E_{\perp,\text{spr,mu}}$            | $137 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Schubmodul in XY-Richtung     | $G_{\parallel\perp,\text{spr,mu}}$   | $459 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Schubmodul in YZ-Richtung     | $G_{\perp\perp,\text{spr,mu}}$       | $74 \cdot 10^6$    | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Schubmodul in XZ-Richtung     | $G_{\parallel\perp,\text{spr,mu}}$   | $459 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Querdehnzahl in XY-Richtung   | $\nu_{\parallel\perp,\text{spr,mu}}$ | 0.05               | [–]   |
| Querdehnzahl in YZ-Richtung   | $\nu_{\perp\perp,\text{spr,mu}}$     | 0.3                | [–]   |
| Querdehnzahl in XZ-Richtung   | $\nu_{\parallel\perp,\text{spr,mu}}$ | 0.05               | [–]   |
| Federsteifigkeit der Kopplung | $k_{y,\text{lin}}$                   | 10                 | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$    |

### 7.2.3 Holzbalkendecke

Die Holzbalkendecke besteht aus einzeln oder paarweise parallel angeordneten Holzbalken, deren Regelquerschnitt 0.06 m x 0.24m beträgt. Diese sind an den Auflagern durch Querbalken lagegesichert. Als Beplankung werden Grobspanplatten mit einer Dicke von 19 mm aufgebracht. Die einzelnen Grobspanplatten besitzen die Abmessungen 2.5 m x 1.25 m, sie werden versetzt mit der Haupttragrichtung in Querrichtung zur Balkenlage angeordnet.



**Abbildung 7.9:** Reale Struktur HBD

### 7.2.3.1 Idealisierung

Sowohl Einzel- als auch Doppelbalken werden unter Vernachlässigung des Schnittmusters als orthotrope Volumina abgebildet. Zur Modellierung der Sicherung gegen Kippen werden die Balkenenden in  $y$ -Richtung festgehalten. Die Grobspanplatten werden als orthotrope fugenlose Platte über die gesamte Grundfläche idealisiert. Die Verbindung von Balkenvolumen und Plattenfläche wird durch eine starre Verbindung der Kontaktflächen abgebildet.

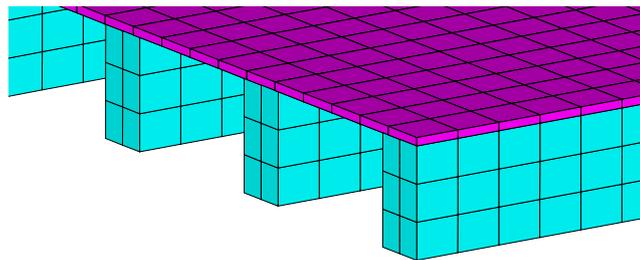


Abbildung 7.10: FE Ausschnitt HBD

### 7.2.3.2 Diskretisierung

Da auch hier für die Balken quaderförmige Volumina vorliegen, werden diese ebenfalls mit 3D-Volumenelemente modelliert. Ein Vergleich der zur Verfügung stehenden Volumenelemente zeigt, dass mit den hexaeder-förmigen 20-knotigen SOLID186-Elemente die Realität adäquat abgebildet werden kann, zudem ermöglicht der zusätzliche Mittelknoten eine mittige Anordnung der Deckenabhängiger in Kapitel 7.2.6 unabhängig von der Balkenbreite. Für die Modellierung der Grobspanplatte werden vier-knotige SHELL181 Schalenelemente verwendet. Die Schalenelemente werden als gleichförmiges Raster gebildet, um das akustische Auswertemodell (s. Kapitel 7.4.1) anwenden zu können. Da die Balken in einem anderen Raster und zudem mit Elementen höherer Ordnung erzeugt werden, wird für die Verbindung ein Fläche-Fläche-Kontakt gewählt. Dazu werden Kontaktpaare aus acht-knotigen CONTA174-Elementen an der Kontaktfläche der Balken und 4-knotigen TARGE170-Elementen an der Kontaktfläche der Grobspanplatte gebildet. Es wird ein starrer Kontakt ohne die Möglichkeit einer Separation gewählt.

**Das SOLID186-Element** ist eine 20-knotiges 3D-Volumenelement höherer Ordnung. Es besitzt quadratische Ansatzfunktionen für die Verschiebung. Jeder der 20 Knoten hat drei Freiheitsgrade: Verschiebung in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung. Das Element kann ferner plastische und

hyperelastische Materialeigenschaften aber auch Kriechen und Steifigkeitssteigerungen unter Lasteinwirkung abbilden. Es ist für große Verformungen und Dehnungen verwendbar. Diese Eigenschaften werden hier nicht benötigt.

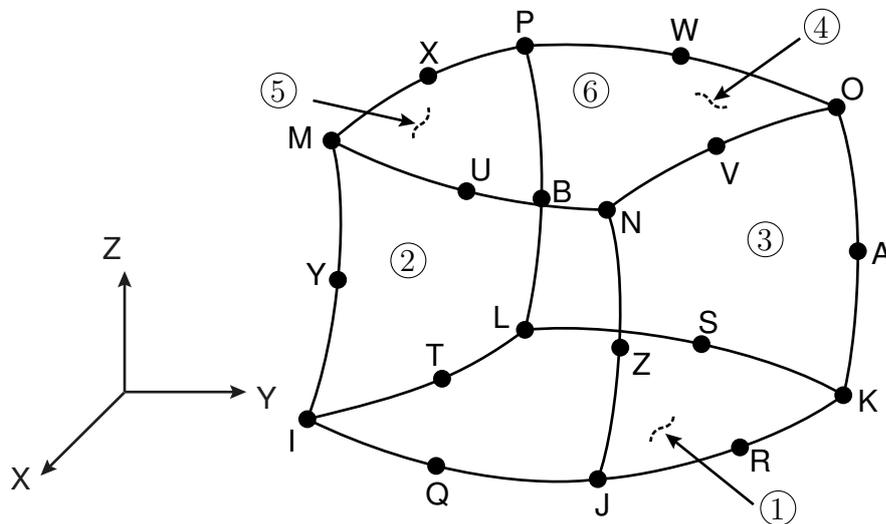


Abbildung 7.11: SOLID186-Element [4]

**Das SHELL181-Element** wird zur Modellierung dünner bis mitteldicker Schalen verwendet. Es ist ein vier-knotiges Element mit sechs Freiheitsgraden je Knoten: Verschiebungen in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung, sowie Rotationen um die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse. Es kann für lineare Problemstellungen mit großen Rotationen aber auch für nichtlineare Simulationen mit großen Dehnungen verwendet werden.

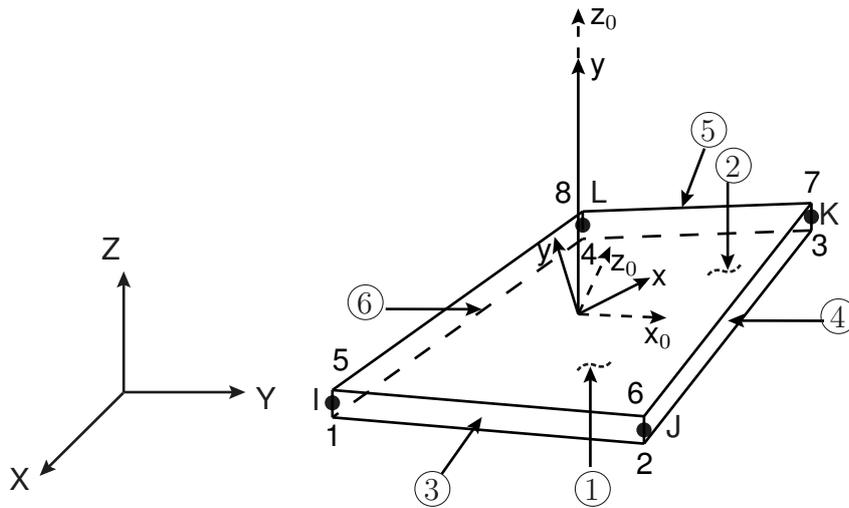


Abbildung 7.12: SHELL181-Element [4]

**Das CONTA174-Element** wird zur Modellierung eines Kontakts, bzw. eines Gleitens zwischen einer „Ziel“-Oberfläche (TARGE170) und einer verformbaren Oberfläche, bestehend aus diesem Element, verwendet. Es hat drei translatorische Freiheitsgrade je Knoten. Dieses Element wird auf die Oberfläche eines 3D Volumen- oder Schalenelements mit Mittelknoten (z.B. SOLID186) definiert. Es hat dieselben geometrischen Charakteristika wie das Volumen- oder Schalenelement, auf das es aufgebracht wurde. Der Kontakt wird hergestellt sobald die Elementoberfläche eines der TARGE170-Elemente die „Ziel“-Oberfläche durchstößt.

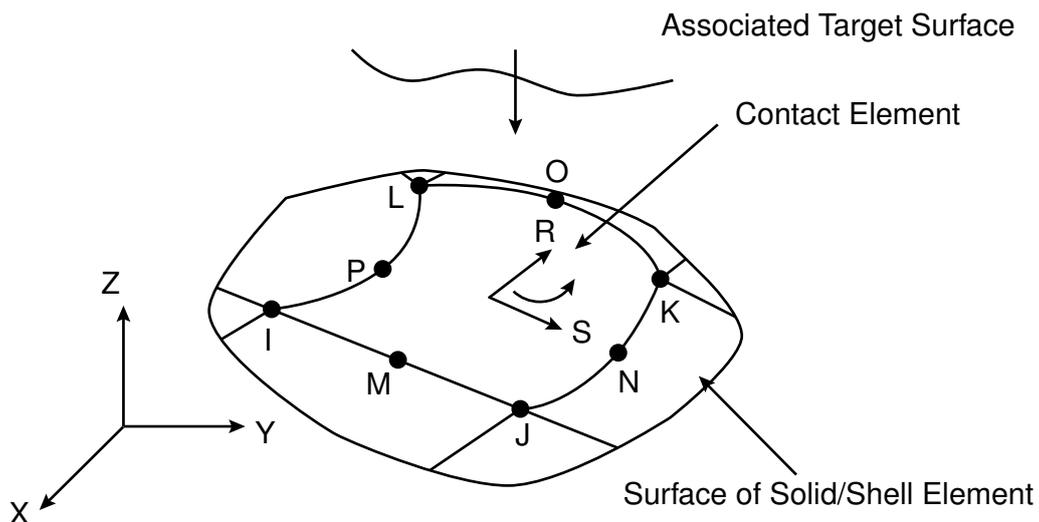


Abbildung 7.13: CONTA174-Element [4]

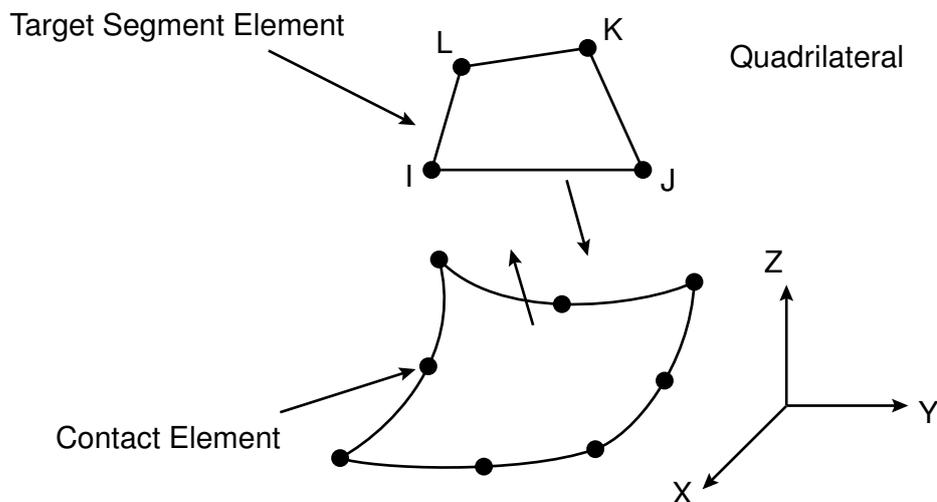


Abbildung 7.14: TARGE170-Element [4]

**Das TARGE170-Element** wird zur Darstellung dreidimensionaler „Ziel“-Oberflächen für die zugeordneten Kontakt-Elemente (CONTA173 und CONTA174) verwendet. Die „Ziel“-Oberfläche wird mit TARGE170-Elementen diskretisiert. Um diese den jeweiligen Kontaktelementen zuzuordnen zu können, werden die potentiellen Kontaktpaare durch die Zuordnung einer für beide Seiten gleichlautenden Konstante markiert. Die TARGE170-Elemente können mit jeder Art Verschiebung oder Rotation beaufschlagt werden.

### 7.2.3.3 Parameter

Die Holzbalkendecken lassen sich, je nach dem ob Einzel- oder Doppelbalken verwendet werden, in zwei Typen einteilen. Über den Parameter  $t_{\text{HBD}}$  wird der jeweilige Typ ausgewählt. Er kann die Werte 1 und 2 annehmen und steuert damit die Breite des Balkenvolumens. Im Falle der Teststruktur wird eine Holzbalkendecke des Typs 2 verwendet. Die Anzahl der Balken wird indirekt über den Parameter Balkenabstand  $d_{\text{beam}}$  bestimmt. Dazu wird die Gesamtbreite  $w_{\text{tot}}$  abzüglich einer Balkenbreite durch  $d_{\text{beam}}$  geteilt, aufgerundet und um den Wert 1 ergänzt. Wie die Bretter der BSD bestehen auch die Holzbalken der HBD aus Fichtenholz. Auf ein Model-Updating der Materialparameter wird aufgrund der starken Streuung der Steifigkeit der Balken verzichtet. Stattdessen werden die Materialparameter aus der Literatur [43] verwendet. Der Vergleich der damit erzielten Eigenfrequenzen der einzelnen Balken entspricht in guter Näherung

dem Mittelwert der in Kapitel 8.2.3.1 experimentell ermittelten Eigenfrequenzen. Für die Grobspanplatte werden die Materialparameter auf unterschiedliche Weise ermittelt. Die Dichte wird durch Wiegen, die E-Moduli in Haupt- und Nebentragrichtung anhand einer experimentellen Modalanalyse hergeleitet. In jedem Fall wird dabei über die Ergebnisse der Einzelmessungen gemittelt. Die übrigen Parameter sind nicht ohne größeren Messaufwand ermittelbar und werden aus der Literatur [35] übernommen.

In den folgenden Tabellen sind die Parameter des HBD-Moduls und deren Werte für die Modellierung der getesteten Struktur aufgelistet.

**Tabelle 7.5:** Geometrische Parameter HBD

| Parameter     | Variable          | Wert | Einheit |
|---------------|-------------------|------|---------|
| HBD-Typ       | $t_{\text{HBD}}$  | 2    | [–]     |
| Balkenabstand | $d_{\text{beam}}$ | 0.5  | [m]     |

**Tabelle 7.6:** Materialparameter Fichte(HBD)

| Parameter                   | Variable                            | Wert               | Einheit                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------|---|
| Dichte der Balken           | $\rho_{\text{spr},l}$               | 500                | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| E-Modul in X-Richtung       | $E_{\parallel,\text{spr},l}$        | $10000 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| E-Modul in Y-Richtung       | $E_{\perp,\text{spr},l}$            | $450 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| E-Modul in Z-Richtung       | $E_{\perp,\text{spr},l}$            | $450 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Schubmodul in XY-Richtung   | $G_{\parallel\perp,\text{spr},l}$   | $650 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Schubmodul in YZ-Richtung   | $G_{\perp\perp,\text{spr},l}$       | $40 \cdot 10^6$    | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Schubmodul in XZ-Richtung   | $G_{\parallel\perp,\text{spr},l}$   | $650 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Querdehnzahl in XY-Richtung | $\nu_{\parallel\perp,\text{spr},l}$ | 0.014              | [–]   |
| Querdehnzahl in YZ-Richtung | $\nu_{\perp\perp,\text{spr},l}$     | 0.27               | [–]   |
| Querdehnzahl in XZ-Richtung | $\nu_{\parallel\perp,\text{spr},l}$ | 0.014              | [–]   |

**Tabelle 7.7:** Materialparameter OSB

| Parameter                   | Variable         | Wert              | Einheit                                     |
|-----------------------------|------------------|-------------------|---|
| Dichte der Balken           | $\rho_{OSB,m}$   | 623               | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| E-Modul in X-Richtung       | $E_{x,OSB,m}$    | $6097 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| E-Modul in Y-Richtung       | $E_{y,OSB,m}$    | $2055 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| E-Modul in Z-Richtung       | $E_{z,OSB,l}$    | $250 \cdot 10^6$  | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Schubmodul in XY-Richtung   | $G_{xy,OSB,l}$   | $1090 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Schubmodul in YZ-Richtung   | $G_{yz,OSB,l}$   | $60 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Schubmodul in XZ-Richtung   | $G_{xz,OSB,l}$   | $1090 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Querdehnzahl in XY-Richtung | $\nu_{xy,OSB,l}$ | 0.27              | $[-]$                                       |
| Querdehnzahl in YZ-Richtung | $\nu_{yz,OSB,l}$ | 0.25              | $[-]$                                       |
| Querdehnzahl in XZ-Richtung | $\nu_{xz,OSB,l}$ | 0.25              | $[-]$                                       |

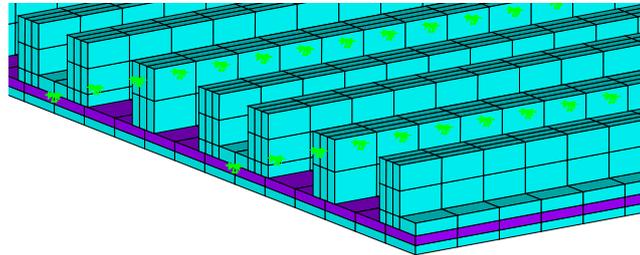
## 7.2.4 Hohlkastendecke

Die verwendete Hohlkastendecke wird in Kapitel 2.1.3 vorgestellt. Wie bei der Brettsperrholzdecke handelt es sich um einzelne streifenförmige Deckenelemente, die linienförmig verbunden werden. Die verschiedenen Deckentypen unterscheiden sich dabei nur in ihrem vertikalen Aufbau und haben immer eine Breite von 0.625 m. Jedes Element besteht aus mehreren Stegen mit - je nach Deckentyp - unterschiedlicher Anzahl verleimter, in der Breite variierender Fichtenbretter, die auf einen zweilagigen Brettsperrholzuntergurt geleimt werden. Zur Verbindung der einzelnen Deckenelemente werden Fichtenbretter über die Stoßfuge verlegt und beidseitig verschraubt.

### 7.2.4.1 Idealisierung

Idealisiert lässt sich die Hohlkastendecke als eine Kombination von Brettsperrholzdecke im unteren Bereich und Holzbalkendecke für die Stege annehmen. Die variierende Breite der Stege wird vernachlässigt und wie die Holzbalken der Holzbalkendecke als quaderförmige orthotrope Volumina modelliert (s. Abschnitt 7.2.3), wobei die Verbindung der Bretter untereinander als starr angenommen wird. Die Verbindung von Stegvolumina und Brettsperrholzschicht wird durch eine

starre Verbindung der Kontaktflächen realisiert. Bei der Kopplung der Deckenelemente werden zur Modellierung der Fichtenbretter elastische Federn eingesetzt.



**Abbildung 7.15:** FE Ausschnitt HKD

#### 7.2.4.2 Diskretisierung

Die Volumina sowohl der Stege als auch der beiden Brettsperrholzschichten werden mit 3D-Volumenelemente SOLID185 modelliert (s. Abb. 7.15). Zur Verbindung der Stege mit dem Untergurt wird wie bei der Verbindung der Balken mit der OSB-Platte ein Fläche-Fläche-Kontakt gewählt (s. Abschnitt 7.2.3). Die Kopplung der einzelnen Deckenelemente erfolgt analog zur Kopplung der Plattenstreifen der Brettsperrholzdecke (s. Abschnitt 7.2.2).

#### 7.2.4.3 Parameter

Analog zur Brettsperrholzdecke lassen sich die Querschnittsabmessungen durch die Parameter HKD-Typ  $t_{\text{HKD}}$  und Anzahl der Platten  $n$  festlegen. Für die Materialparameter des Fichtenholzes werden die Parameter aus Tabelle 7.6, für die Steifigkeit der Koppelfeder wird der Wert von  $k_{y,\text{lin}}$  aus Tabelle 7.4 angesetzt.

#### 7.2.5 Estrich

Die Rohdecken werden je nach Ausbaurzustand um einen Estrich ergänzt. Dabei kommen sowohl Fließ- als auch Trockenestriche zum Einsatz, die schwimmend auf einer Trittschalldämmschicht verlegt werden.



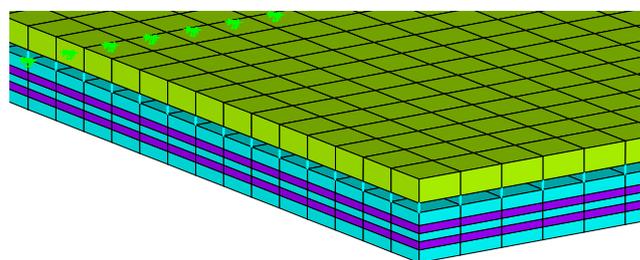
**Abbildung 7.16:** Reale Struktur Fließestrich

### 7.2.5.1 Idealisierung

Der Estrich wird als isotrope Platte modelliert, die Unterscheidung in Fließ- oder Trockenestrich geschieht über die Wahl der Materialparameter. Die Trittschalldämmung wird über Längsfedern idealisiert.

### 7.2.5.2 Diskretisierung

Der Estrich wird mithilfe von SHELL181 Schalenelementen diskretisiert. Das Elementenetz wird dabei so gewählt, dass es dem Netz der jeweiligen darunterliegenden Rohdecke entspricht. Auf diese Weise kann die Trittschalldämmung mit COMBIN14 Feder-Dämpfer-Elementen abgebildet werden, die zwischen je zwei vertikal übereinander liegenden Knoten von Rohdecke und Estrich erstellt werden.



**Abbildung 7.17:** FE Ausschnitt Estrich

### 7.2.5.3 Parameter

Für den Estrich werden die Materialparameter den Herstellerangaben der Firma Knauf [27] entnommen. Auch für die Steifigkeit der Trittschalldämmung werden Herstellerangaben verwendet. Da diese jedoch in  $\left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^3}\right]$  vorliegen, müssen diese zunächst auf Federsteifigkeiten in  $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$  umgerechnet werden, die dann auf den jeweilige Einzugsbereich der Federelemente abgestimmt werden muss. Dieser entspricht den Abmessungen eines Schalen-Elements.

In den Tabellen 7.8 und 7.9 sind die geometrischen Parameter des Estrich-Moduls und die angesetzten Werte für die Modellierung des Fließestrichs aufgelistet.

**Tabelle 7.8:** Geometrische Parameter Estrich

| Parameter                | Variable         | Wert | Einheit |
|--------------------------|------------------|------|---------|
| Dicke Estrich            | $d_{\text{ff}}$  | 0.05 | [m]     |
| Dicke Trittschalldämmung | $d_{\text{ins}}$ | 0.02 | [m]     |

**Tabelle 7.9:** Materialparameter Estrich und Trittschalldämmung

| Parameter                                 | Variable             | Wert               | Einheit                                     |
|---|----------------------|--------------------|---|
| Dichte Estrich                            | $\rho_{\text{ff},1}$ | 2000               | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| E-Modul Estrich                           | $E_{x,\text{ff},1}$  | $25000 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Querdehnzahl Estrich                      | $\nu_{\text{ff},1}$  | 0.2                | [–]   |
| Dynamische Steifigkeit Trittschalldämmung | $s_{\text{ins},1}$   | $20 \cdot 10^6$    | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3}\right]$  |

### 7.2.6 Abgehängte Decke

Das zweite Ergänzungsmodul bildet die abgehängte Decke. Dabei werden über Direktschwingabhängiger zunächst kreuzweise Grund- und Tragkonstruktion aus Stahlblech C/D-Profilen 60/27/06 (s. Abb. 7.18) abgehängt. An dieser Unterkonstruktion werden in doppelter Beplankung Gipsfaserplatten montiert. Diese werden kreuzweise in zwei Schichten mit den Abmessungen 2.50 m x 1.25 m x 0.0125 m miteinander verschraubt.



**Abbildung 7.18:** Reale Struktur Abgehängte Decke

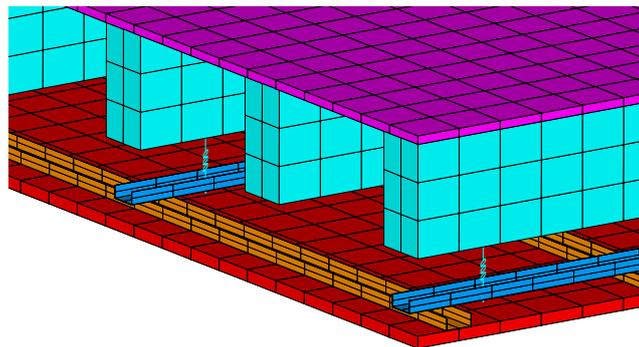
### 7.2.6.1 Idealisierung

Die Direktschwingabhänger werden als Feder-Dämpferelemente modelliert, die zwischen Rohdecke und Unterkonstruktion angeordnet werden. Dies hat unter anderem den Vorteil, dass unterschiedliche Abhängertypen simuliert werden können. Voraussetzung dafür ist die vorhergehende Ermittlung deren Dämpfungs- und Steifigkeitseigenschaften. Die Unterkonstruktion wird als linienförmige Balken, die Beplankung unter Vernachlässigung der einzelnen Gipsfaserplatten als durchgängige isotrope Platte modelliert. Die daraus resultierende Überschätzung der Biegesteifigkeit wird über eine Anpassung der Materialparameter ausgeglichen (s. Kapitel 8.3.1). Zwischen Beplankung und Traglattung wird die Verschraubung durch eine starre Kopplung idealisiert. Das Luftvolumen zwischen Rohdecke und Gipsfaserplatten wird als Volumenkörper modelliert. Im Falle der Holzbalkendecke durchdringen sich die Volumina der Holzbalken und der Luft. In Kapitel 8.4 wird gezeigt, dass diese Idealisierung keinen maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Simulationsergebnisse hat. Das Luftvolumen wird als Untermodul zur abgehängten Decke erstellt. Die verwendeten akustischen Fluid-Elemente haben erheblichen Einfluss auf den Berechnungsaufwand (s. Abschnitt 7.3.1) und können optional verwendet werden.

### 7.2.6.2 Diskretisierung

Die Feder-Dämpfer-Elemente der Abhänger werden mit COMBIN14-Elementen, die Unterkonstruktion mit Balkenelementen BEAM188 diskretisiert. Die nicht modellierten Querschnittsabmessungen der C/D-Profile werden den Elementen als zusätzliche Parameter hinzugefügt. Die Beplankung wird über Schalen-Elemente SHELL181 modelliert. Das Luftvolumen zwischen Rohdecke und Beplankung wird mit Hexaederförmigen acht-knotigen akustischen Fluid-Elementen

FLUID30 modelliert. Die Verschiebungs-Freiheitsgrade sind dabei - wie bei der BSD - durch ko-  
 inzidente Knoten gekoppelt. Dies ist möglich, da das Elementnetz der Strukturen und des Fluids  
 in horizontaler Richtung übereinstimmt. Zusätzlich werden zur Kopplung des Drucks innerhalb  
 der Fluid-Elemente Fluid-Struktur-Interaktions-Randbedingungen an den Kontaktflächen aufge-  
 bracht. An den Rändern in horizontaler Richtung wird eine Umgebung durch Aufbringen von  
 Dämpfungseffekten über Impedanz-Randbedingungen simuliert. Die Traglattung wird so diskre-  
 tisiert, dass zur Kopplung mit den Schalen-Elementen der Beplankung die Knoten beider Struk-  
 turen übereinander liegen. Die Grundlattung wird auf gleiche Weise an die Knoten der Roh-  
 decken angepasst, um je zwei Knoten für die COMBIN14-Elemente der Abhänger zu erhalten.  
 Dazu müssen die Positionen von Unterkonstruktion und Abhängern an das Elementraster ange-  
 passt werden, wodurch eine Änderung der Abmessungen nur in Schrittweiten von  $e_{size} = 0.1\text{m}$   
 möglich ist. Zur Kopplung von Grund- und Traglattung wird zwischen den jeweils nächsten Kno-  
 ten interpoliert. Dies ist notwendig, da im Falle der HBD die Holzbalken nicht dem Raster folgen,  
 die Abhänger jedoch daran befestigt werden und demzufolge die Knoten der Unterkonstruktion  
 in den Schnittpunkten nicht übereinander liegen.



**Abbildung 7.19:** FE Ausschnitt abgehängte Decke

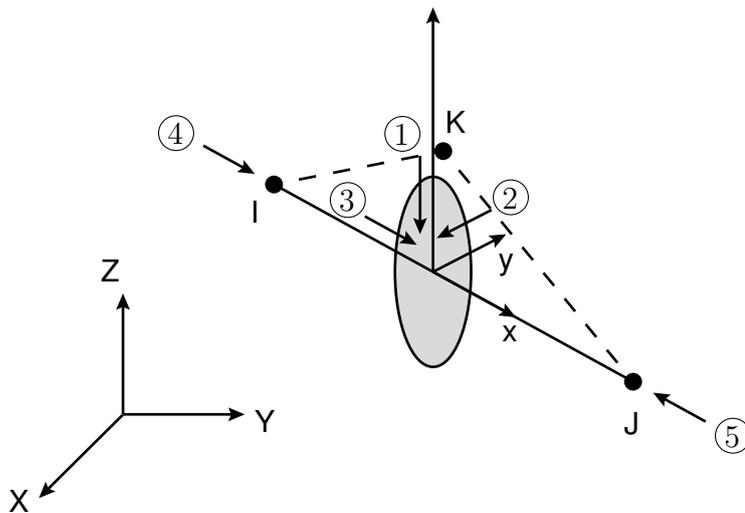


Abbildung 7.20: BEAM188-Element [4]

**Das BEAM188-Element** kann für dünne und mitteldicke Balkenstrukturen verwendet werden. Das Element basiert auf der Balkentheorie von Timoschenko, die Schubdeformationen mit einbezieht. Das BEAM188-Element ist ein lineares zwei-knotiges 3D-Balkenelement mit sechs Freiheitsgraden an jedem Knoten, Verschiebung in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung, sowie die Rotationen um die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse. Es wird eine unbehinderte Verwölbung der Querschnitte angenommen. BEAM188-Elemente sind für Anwendungen mit linearer großer Rotation oder nichtlinearer großer Dehnung gut geeignet.

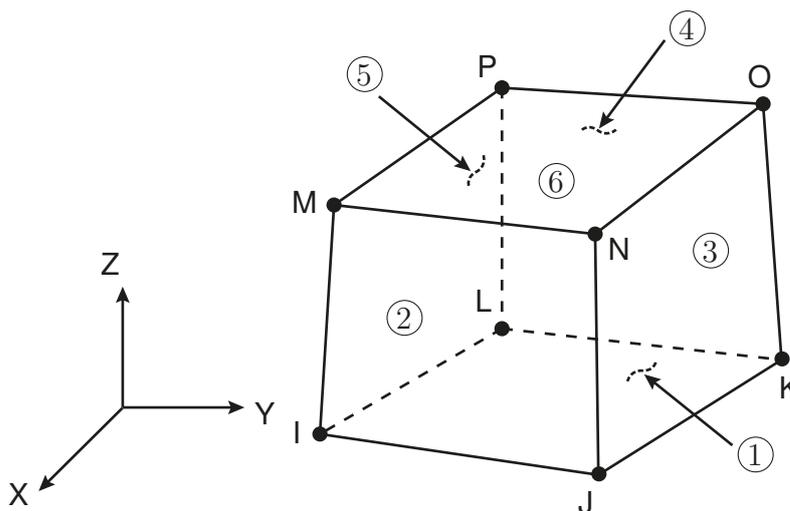


Abbildung 7.21: FLUID30-Element [4]

**Das FLUID30-Element** wird zur Modellierung von Fluiden und Problemen mit Fluid-Struktur-Interaktion verwendet. Es wird typischerweise zur Simulation der Schallausbreitung oder der Dynamik an Fluide grenzender Strukturen verwendet. Die Grundgleichung der Akustik, die Wellengleichung, wird unter Berücksichtigung der Kopplung von Schalldruck und Bewegungen der Struktur an der Schnittstelle diskretisiert. Es handelt sich um ein quaderförmiges acht-knotiges Element mit jeweils vier Freiheitsgraden pro Knoten: Die Verschiebungs-Freiheitsgrade in alle drei Raumrichtungen und der Schalldruck. Die Verschiebungen können jedoch nur bei den Knoten an der Schnittstelle verwendet werden. An der Schnittstelle können darüber hinaus Dämpfungseffekte infolge absorbierender Materialien aufgebracht werden. Das Element kann in Verbindung mit anderen 3D-Strukturelementen zur Durchführung von unsymmetrischen und gedämpften Modalanalysen, sowie bei harmonischen oder transienten Analysen verwendet werden. Bei den letzten beiden Analysen muss jedoch die Methode mit vollständiger Lösung der Systemmatrizen gewählt werden. Das Element wird über acht Knoten, einen Referenz-Schalldruck und die isotropen Materialparameter definiert, welche aus den Eingabeparametern Schallgeschwindigkeit und Luftdichte hergeleitet werden. Dämpfungseffekte innerhalb des Fluids werden vernachlässigt. Die Schallabsorption an der Schnittstelle wird über eine Dämpfungsmatrix die sich aus der Oberfläche und der Admittanz an der Schnittstelle ergibt abgebildet. Experimentell gemessene Werte für die Rand-Admittanzen des absorbierenden Materials können dazu als Materialparameter eingegeben werden.

### 7.2.6.3 Parameter

Die Querschnittsabmessungen der C/D-Profile und die Gesamtdicke der Gipskartonplatten sind in Tabelle 7.10 aufgelistet. Diese werden im Laufe der Parameterstudien als feste Größen angesetzt und nicht variiert.

**Tabelle 7.10:** Bauteilabmessungen

| Parameter                 | Variable              | Wert   | Einheit |
|---------------------------|-----------------------|--------|---------|
| Dicke Gipsfaserplatte     | $t_{\text{board}}$    | 0.025  | [m]     |
| Wandstärke C/D-Profil     | $t_{\text{profil}}$   | 0.006  | [m]     |
| Breite Flansch C/D-Profil | $w_{1,\text{profil}}$ | 0.0027 | [m]     |
| Höhe Steg C/D-Profil      | $w_{2,\text{profil}}$ | 0.06   | [m]     |

Das Raster der Tragkonstruktion wird über die geometrischen Parameter in Tabelle 7.11 be-

schrieben. In der Tabelle sind exemplarisch die Werte für die untersuchte Unterdecke unter der Brettsper Holzdecke aufgeführt. Das entsprechende Raster unter der BSD ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

**Tabelle 7.11:** Geometrische Parameter abgehängte Decke

| Parameter                | Variable          | Wert  | Einheit |
|--------------------------|-------------------|-------|---------|
| Randabstand Grundlattung | $a_{y,edge}$      | 0.235 | [m]     |
| Abstand Grundlattung     | $a_y$             | 1.0   | [m]     |
| Randabstand Traglattung  | $a_{x,edge}$      | 0.1   | [m]     |
| Abstand Traglattung      | $a_x$             | 0.5   | [m]     |
| Randabstand Abhänger     | $a_{x,hang,edge}$ | 0.335 | [m]     |
| Abstand Abhänger         | $a_{x,hang}$      | 0.95  | [m]     |
| Länge Abhänger           | $l_{hang}$        | 0.135 | [m]     |

Die Dichte der Gipskartonplatten der Beplankung wird aus dem von Tröbs [54] ermittelten Gesamtgewicht der Konstruktion hergeleitet. Das idealisierte E-Modul der Platten wird in Kapitel 8.3.1 [60] iterativ über den Vergleich der Biegewellenzahlen je Frequenzschritt von Experiment und Simulation angenähert. Um die Abhänger idealisiert als Feder-Dämpfer-System darstellen zu können, werden in Kapitel 8.3.2 [34] für verschiedene Abhängersysteme die idealisierten Steifigkeits- und Dämpfungsparameter mithilfe einer experimentellen Modalanalyse ermittelt. Für das Luftvolumen wird über den Parameter  $\mu_{Air,i}$  die Absorption der das Luftvolumen umgebenden Strukturen eingestellt. Dieser Parameter kann Werte zwischen 0 und 1.0 annehmen, was vollständiger Reflexion bzw. vollständiger Absorption entspricht. Für den Deckenprüfstand in Rosenheim wird ein in Kapitel 7.4.1 iterativ ermittelter Wert von  $\mu_{Air,i} = 0.03$  angenommen. Die restlichen Materialparameter werden der Literatur entnommen.

Alle verwendeten Materialparameter im Modul für drei abgehängte Decken sind in Tabelle 7.12 zusammengefasst.

**Tabelle 7.12:** Materialparameter abgehängte Decke

| Parameter                     | Variable                 | Wert                | Einheit                                     |
|-------------------------------|--------------------------|---------------------|---|
| Dichte Gipskartonplatte       | $\rho_{\text{gypsum,m}}$ | 856                 | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| E-Modul Gipskartonplatte      | $E_{x,\text{gypsum,m}}$  | $1020 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Querdehnzahl Gipskartonplatte | $\nu_{\text{gypsum,l}}$  | 0.2                 | $[-]$                                       |
| Dichte Stahlblech             | $\rho_{\text{steel,l}}$  | 7850                | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| E-Modul Stahlblech            | $E_{x,\text{steel,l}}$   | $210000 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Querdehnzahl Stahlblech       | $\nu_{\text{steel,l}}$   | 0.3                 | $[-]$                                       |
| Federsteifigkeit (DSA)        | $k_{\text{DSA,m}}$       | $0.165 \cdot 10^6$  | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$    |
| Dämpfungskonstante (DSA)      | $c_{\text{DSA,m}}$       | 78                  | $\left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}}\right]$   |
| Dichte Luft                   | $\rho_{\text{air,l}}$    | 1.2                 | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| Schallgeschwindigkeit         | $c_{\text{air,l}}$       | 344                 | $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$    |
| Absorptionsgrad Berandung     | $\mu_{\text{air,i}}$     | 0.03                | $[-]$                                       |

## 7.2.7 Auflagerbedingungen

Unabhängig davon welches Deckensystem in welchem Ausbauzustand durch Kombination der zuvor beschriebenen Module erzeugt wurde, wird eines der in Folgenden beschriebenen Auflager-Module geladen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Komplexität und der möglichen statischen Modelle. Im einfachsten Modell werden gelenkige Linienlager erzeugt, in einem weiteren lassen sich Einspanneffekte simulieren. Für das dritte, komplexeste Modell werden Elastomerstreifen als zusätzliche Strukturen modelliert. Dieses Modell bietet die größte Realitätsnähe.

### 7.2.7.1 Einfache gelenkige Lagerung

Bei dieser Lagerungsart werden die Verschiebungs-Freiheitsgrade der unteren Randknoten der Haupttragstrukturen festgehalten. So entstehen - je nach erforderlichem statischem System - zwei- bzw. allseitig Navier-gelagerte platten-ähnliche Strukturen. Um Zwängungen zu vermeiden, werden bei zweiseitiger Lagerung die Freiheitsgrade einer Seite in der globalen  $x$ -Richtung nicht behindert.

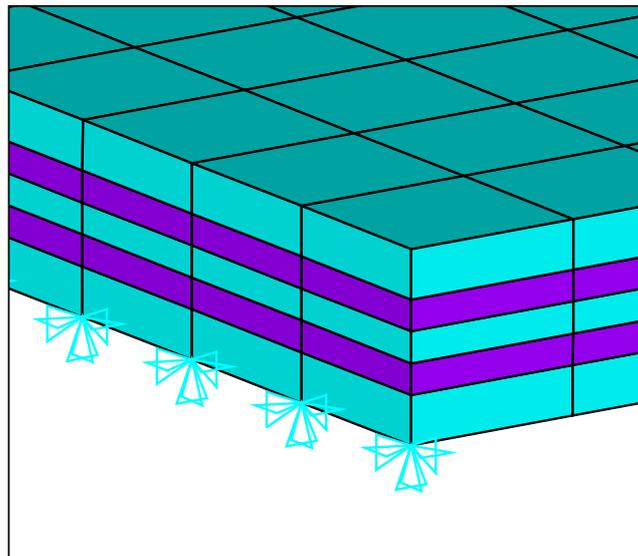


Abbildung 7.22: FE Modell einfache Lagerung

### 7.2.7.2 Teileingespannte Lagerung

Eine Teileinspannung wird mithilfe von Torsionsfeder-Elementen realisiert (s. Abb. 7.23). Aufgrund der fehlenden Rotations-Freiheitsgrade der Volumenelemente sind dazu in der Modellierung zusätzliche Maßnahmen zur Abbildung des Widerstands gegen Rotation notwendig: Ausgehend vom Modul zur einfachen gelenkigen Lagerung wird zugehörig zu jedem bestehenden Knoten ein darüber liegender weiterer Knoten erstellt und als masseloses Masse-Element MASS21 diskretisiert (hellblaue Knoten in Abb. 7.23). Diese Elemente besitzen Rotationsfreiheitsgrade. Anschließend werden alle vertikal über den Knoten der gelenkigen Lagerung liegenden Randknoten der Rohdecke mit diesem Knoten über kinematische Bedingungen gekoppelt, sodass gewährleistet wird, dass alle übereinanderliegenden Knoten dieselbe Rotation erfahren. Es wird damit ein über die Plattenhöhe ebener Querschnitt erzwungen. Im nächsten Schritt wird ein weiterer Knoten in  $x$ -Richtung versetzt hinter dem Auflager erstellt und dessen Rotations-Freiheitsgrade festgehalten (gelbe Knoten in Abb. 7.23). Das Feder-Element wird dann zwischen diesem und dem Knoten des Masse-Elementes „eingebaut“. Über die Wahl der Federsteifigkeit  $k_{\phi, support}$  kann der Einspanngrad abgebildet werden. Nachteilig bei diesem Modell ist die Behinderung der Verwölbung der Deckenquerschnitte am Rand. Diese wirkt sich umso stärker aus je weniger die Struktur eingespannt ist und je kurzwelliger die charakteristischen Wellenlängen sind. Der Vorteil der im Modell gegebenen Abbildung auch über die Plattenhöhe nicht ebener Querschnitte (Erweiterung der Plattentheorie) geht am Rand verloren. Für eine einfache gelen-

kige Lagerung sollte daher nicht  $k_{\phi, support} = 0$  anstelle des Moduls für die einfache gelenkige Lagerung gewählt werden.

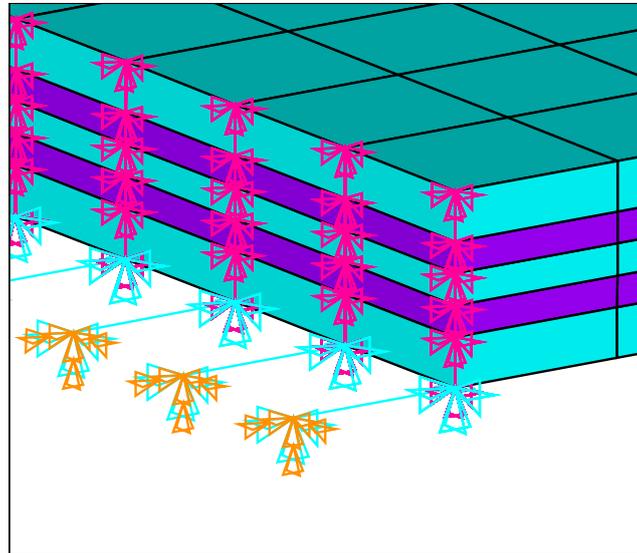


Abbildung 7.23: FE Modell Teileinspannung

**Das MASS21-Element** ist ein Punkt-Element mit bis zu sechs Freiheitsgraden: Verschiebungen in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung und Rotation um die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Achse des Knoten-Koordinatensystems. Jeder Koordinatenrichtung können unterschiedliche Massen oder Massenträgheitsmomente zugeordnet werden. Das Element wird durch einen einzigen Knoten, konzentrierte Massen in den Element Koordinatenrichtungen und Trägheitsmomente um die Element-Koordinatenachsen definiert. Das Element-Koordinatensystem zeigt dabei entweder in Richtung der globalen kartesischen oder der Knoten-Koordinatenrichtungen. Optional können Rotationsträgheitseffekte ausgeschlossen oder das Element als 2D-Element verwendet werden. Wird nur eine Masse zugeordnet, wird diese für alle Raumrichtungen angesetzt. Das Koordinatensystem für dieses Element ist in Abbildung 7.24 abgebildet.

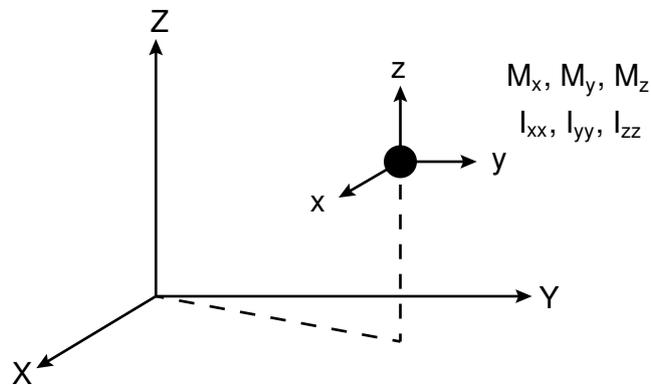


Abbildung 7.24: MASS21-Element [4]

### 7.2.7.3 Elastomerlagerung

Wie in Kapitel 3.6 beschrieben, wird im Rahmen der experimentellen Untersuchungen eine komplexere Konstruktion für die Auflagerung der Testobjekte gewählt. Ziel ist die Ausbildung definierter reproduzierbarer und gleicher Randbedingungen für alle zu testenden Deckensysteme. Dazu werden die Testobjekte in den Auflagepunkten auf Elastomerstreifen gelagert und von oben über ebenfalls mit Elastomerstreifen unterlegten Stahl U-Profilen gegen Abheben gesichert. Dafür werden die U-Profile durch Gewindestangen in regelmäßigem Abstand mit der Auflagerung im Prüfstand verschraubt und leicht vorgespannt.

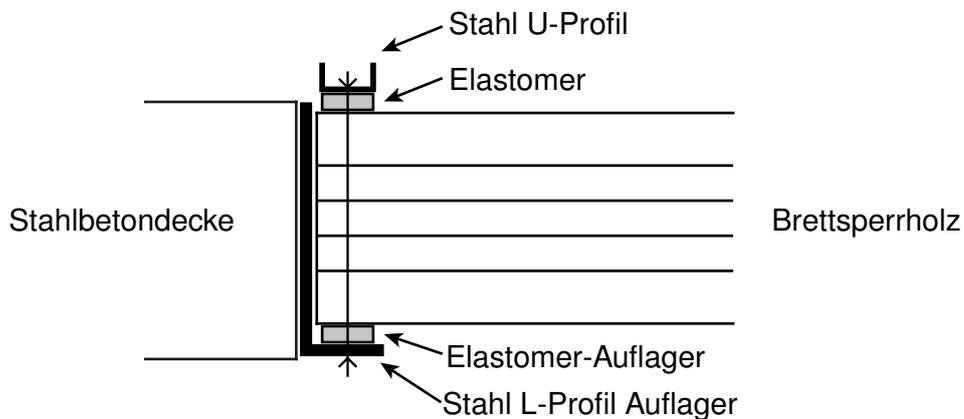
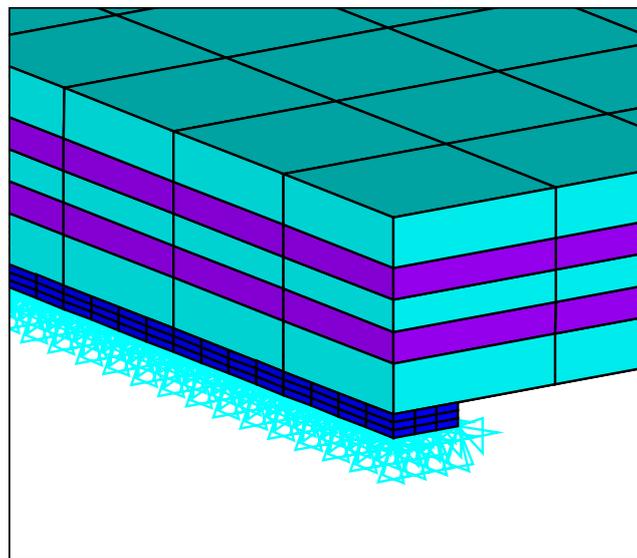


Abbildung 7.25: Skizze Elastomerlagerung

Die unteren Elastomerstreifen werden als Volumenkörper idealisiert und mit SOLD185-Elementen diskretisiert. Aufgrund des geringen Querschnitts wird mit einer Auflösung von 3 auf 3 Elementen ein deutlich feineres Elemente-Netz als bei den Volumenelementen der Rohdecken gewählt. Um die Elastomer-Elemente mit den Rohdecken zu koppeln, werden zwischen den Knoten der jeweiligen Kontaktfläche Bedingungsgleichungen erstellt, die eine starre Verbindung durch Interpolation der Knotenverschiebungen herstellen. Da das Abheben der Struktur so bereits ausgeschlossen wird, kann auf eine Modellierung des U-Profiles und der oberen Lage Elastomerstreifen verzichtet werden.



**Abbildung 7.26:** FE Modell Elastomerlagerung

Die Elastomerstreifen werden aus dem Material „Sylomer“ der Firma Getzner hergestellt. In der Testkonfiguration haben die Streifen Querschnittsabmessungen von 0.0125 auf 0.04 m. Da es sich hierbei um einen nichtlinearen Werkstoff handelt, ist aufgrund der getroffenen Idealisierungen das Ermitteln der Steifigkeitsparameter aus den Herstellerangaben schwierig. Vereinfachend wird daher von einem isotropen Materialverhalten ausgegangen und der E-Modul des Sylomers, wie in Kapitel 8.2.2 beschrieben, mithilfe eines Modell-Updating Algorithmus angenähert.

Die Parameter dieses Moduls sind in Tabelle 7.13 aufgeführt.

**Tabelle 7.13:** Parameter Elastomerlagerung

| Parameter    | Variable                 | Wert              | Einheit                                     |
|--------------|--------------------------|-------------------|---|
| Höhe         | $h_{\text{elasto}}$      | 0.0125            | [m]   |
| Breite       | $w_{\text{elasto}}$      | 0.04              | [m]   |
| Dichte       | $\rho_{\text{elasto,l}}$ | 200               | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| E-Modul      | $E_{x,\text{elasto,m}}$  | $11.3 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| Querdehnzahl | $\nu_{\text{elasto,l}}$  | 0.1               | [–]   |

## 7.3 Dynamische Analysen

Mit den Strukturmodellen werden je nach Aufgabenstellung folgende dynamische Analysen durchgeführt:

- Modalanalyse
- Harmonische Frequenzgang-Analyse
- Transiente Analyse

Für jeden Analysetyp werden wiederum separate Module erstellt, die teilweise aufeinander aufbauen. In Abbildung 7.27 ist das Ablaufschema für die Module im Solution-Processor skizziert. Abhängig vom Analysetyp werden die Strukturmodelle mit unterschiedlichen Belastungen beaufschlagt. Einfache Auswertungen einzelner Berechnungen werden direkt im Anschluss an den Solution-Processor in ANSYS® über die grafische Benutzeroberfläche ausgeführt und werden nicht über eigene Module abgebildet. Zur Veranschaulichung der Analysen werden diese Ergebnisse in die Beschreibung der Solution-Processor Module integriert. Die einzelnen Analysen werden nachfolgend näher erläutert.

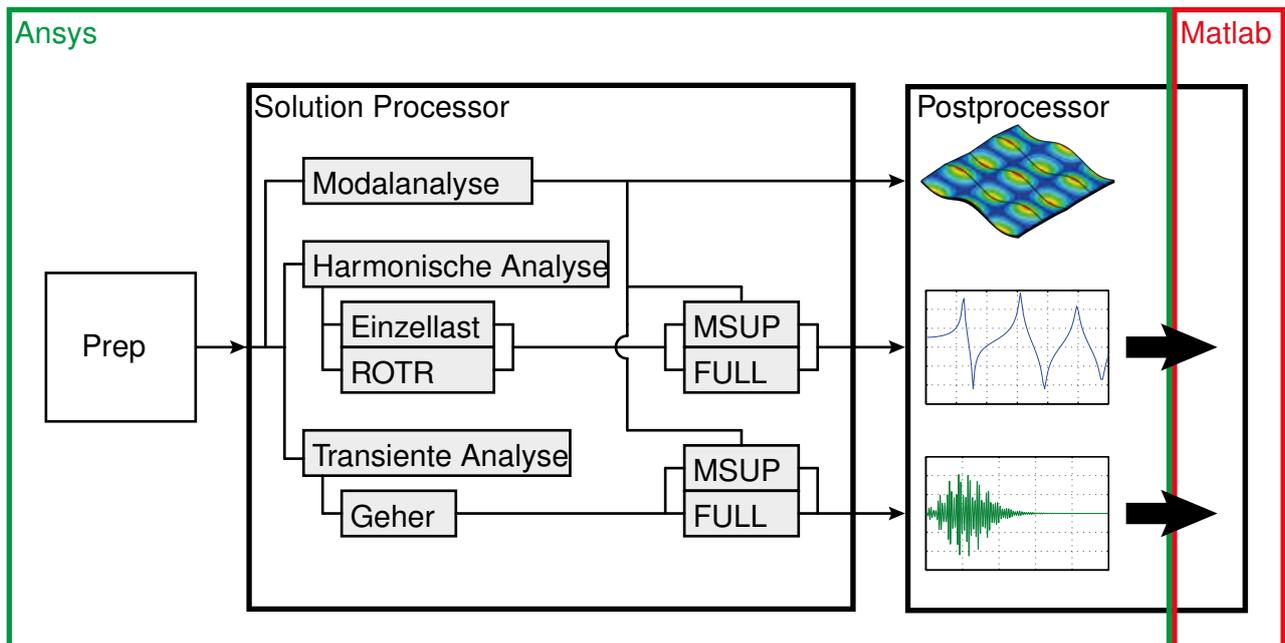


Abbildung 7.27: Modularer Aufbau im Solution und Postprocessor (Ansys)

## 7.3.1 Modalanalyse

In Kapitel 6.3 werden die theoretischen Grundlagen einer ungedämpften Modalanalyse für FE-Modelle erläutert. Auf die Durchführung von gedämpften Modalanalysen wird im Rahmen dieses Projektes aufgrund der geringen Dämpfung der Holzdeckensysteme verzichtet. Die Differenz zwischen gedämpften und ungedämpften Eigenfrequenzen wird als vernachlässigbar klein angenommen.

### 7.3.1.1 Verwendete Methoden zur Modalanalyse

Zur Durchführung der Modalanalysen in ANSYS® wird auf zwei unterschiedliche Methoden zurückgegriffen. Generell wird die Block-Lanczos-Methode angewandt, bei Ausbauständen mit Fluid30-Elementen muss aufgrund der daraus resultierenden unsymmetrischen Matrizen auf die unsymmetrische Methode zurückgegriffen werden.

**Die Block-Lanczos-Methode** ist das gängigste Verfahren zur Eigenwert-Bestimmung und auch für große Matrizen geeignet. Es ist für die meisten Modelle eine effiziente Methode zur

Extrahierung einer großen Anzahl von Moden und wird typischerweise für komplexe Modelle aus einer Mischung von verschiedenen Element-Arten verwendet. Darüber hinaus können damit auch Starrkörper-Moden verarbeitet werden [51].

**Die unsymmetrische Methode** wird vor allem für akustische Probleme verwendet, bei denen Kopplungen mit Strukturen vorkommen, aber auch für andere Anwendungen mit unsymmetrischen Masse- oder Steifigkeitsmatrizen. Hierbei werden komplexe Eigenwerte ermittelt, deren Realteil die Eigenfrequenzen darstellen und über deren Imaginärteil Aussagen zur Stabilität getroffen werden können [51].

### 7.3.1.2 Exemplarische Auswertung

Die Anzahl der zu bestimmenden Eigenmoden wird über den Modell-Parameter  $n_{\text{modes}}$  gesteuert. In den Abbildungen 7.28 und 7.29 sind exemplarisch Eigenmoden der Brettsper Holzdecke abgebildet.

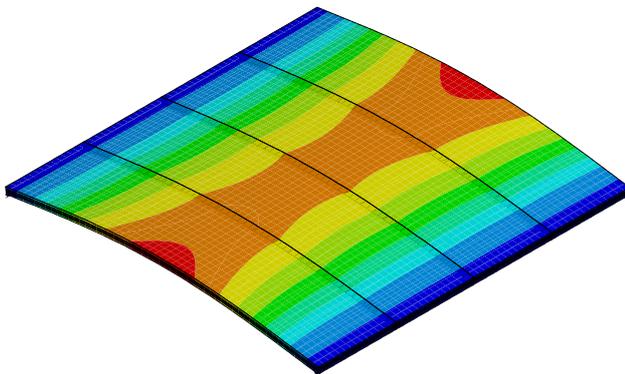


Abbildung 7.28: 10-Mode

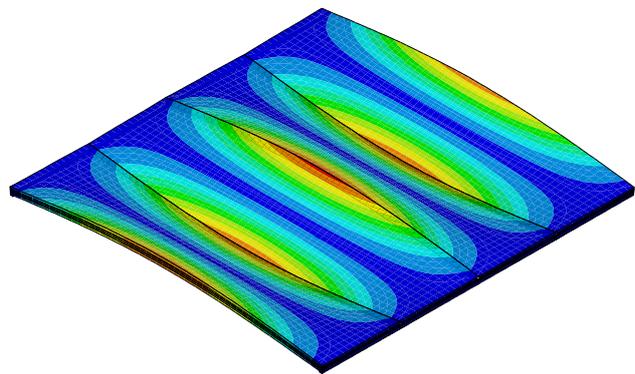


Abbildung 7.29: 15-Mode

### 7.3.2 Harmonische Analyse

Die Harmonische Analyse bildet das numerische Äquivalent zur experimentellen Betriebschwinganalyse (BSA). Dabei werden in einem festgelegten Frequenzbereich anhand der jeweiligen FE-Modelle die Schwingantworten auf eine gegebene Belastung ermittelt (s. Kapitel 7.3.2). Die

Belastungsebene sowie die Knoten für die Ausgabe werden dabei je nach Ausbauzustand parametrisch angepasst, sodass immer die oberste Struktur belastet und die Antwort an der untersten Strukturebene ausgegeben wird. Für eine ganzheitliche Betrachtung der gesamten Systemantwort werden im Postprocessor die mittleren Quadrate über die spektrale Antwort aller Auswertepunkte gebildet. Dieses Verfahren bildet gleichzeitig die Grundlage des in Abschnitt 7.4.1 vorgestellten Verfahrens zur Berechnung der effektiven und der abgestrahlten Schallleistung. Der Frequenzbereich wird über Modell-Parameter  $f_{\min}$ ,  $f_{\max}$  und  $\Delta f$  festgelegt und diskretisiert. In Tabelle 7.14 sind die gewählten Werte für die Vergleichsrechnung zu den experimentellen Daten aufgelistet.

**Tabelle 7.14:** Parameter der harmonischen Analysen

| Parameter            | Variable   | Wert | Einheit |
|----------------------|------------|------|---------|
| Minimale Frequenz    | $f_{\min}$ | 0    | [Hz]    |
| Maximale Frequenz    | $f_{\max}$ | 200  | [Hz]    |
| Frequenzschrittweite | $\Delta f$ | 1.0  | [Hz]    |

### 7.3.2.1 Methoden der Analyse

Bei der harmonischen Analyse stehen in ANSYS® mehrere Analysemethoden zur Verfügung, die sich vor allem im Rechenaufwand bemerkbar machen. Abhängig vom zu untersuchenden Strukturmodell stehen jedoch nicht alle Methoden zur Verfügung.

**Modale Superposition** Wird die Methode Modale Superposition gewählt, muss vor der harmonischen Analyse zunächst eine Modalanalyse durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Schwingantwort werden die Antworten der einzelnen Moden superponiert. Dabei wird empfohlen die Anzahl der zu ermittelnden Eigenmoden so zu wählen, dass mit diesen der 1.5-fache zu betrachtende Frequenzbereich abgedeckt wird. Diese Methode liefert eine erhöhte Rechengeschwindigkeit, kann jedoch nicht in jeder Situation eingesetzt werden. Voraussetzung dafür sind unter anderem symmetrische Systemmatrizen. Ausbauzustände mit Unterdecke und implementierten Fluid-Elementen können daher mit dieser Option nicht berechnet werden.

**Vollständige Lösung** In den Fällen, in denen Modale Superposition nicht verwendet werden kann, wird die Standardmethode der harmonischen Analyse in ANSYS® angewandt. Hierbei

ist für die Berechnung die vollständige Lösung der Systemmatrizen erforderlich, was gegenüber der Modalen Superposition gerade bei großen FE-Modellen zu einem deutlich höheren Rechenaufwand führt.

### 7.3.2.2 Dämpfung

Um die Dämpfung der Strukturmodelle zu berücksichtigen, können in ANSYS® verschiedene Dämpfungsgrößen eingesetzt werden. Für die harmonische Frequenzanalyse wird Rayleigh-Dämpfung angesetzt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Dämpfung proportional zur Masse- oder Steifigkeitsverteilung der Strukturen ist. Die Dämpfungsmatrix  $C_R$  lässt sich demnach mit den beiden Proportionalitätsfaktoren  $\alpha_R$  und  $\beta_R$  aus Massematrix  $M$  und Steifigkeitsmatrix  $K$  zu

$$C_R = \alpha_R M + \beta_R K$$

bestimmen. Die Werte für  $\alpha_R$  und  $\beta_R$  werden in Kapitel aus messtechnisch ermittelten Dämpfungswerten hergeleitet. Die Werte für die Dämpfungsparameter der Brettsperrholzdecke sind in Tabelle 7.15 angegeben.

**Tabelle 7.15:** Parameter Dämpfung

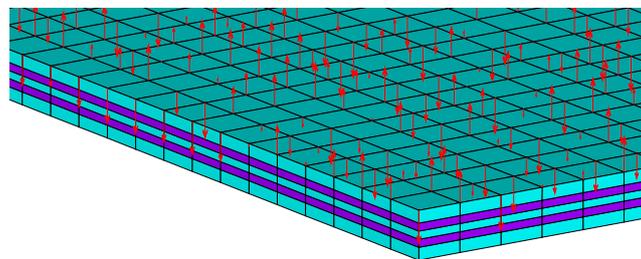
| Parameter                           | Variable   | Wert                 | Einheit |
|-------------------------------------|------------|----------------------|---------|
| Proportionalitätsfaktor Masse       | $\alpha_R$ | 1.13                 | [-]     |
| Proportionalitätsfaktor Steifigkeit | $\beta_R$  | $4.78 \cdot 10^{-5}$ | [-]     |

### 7.3.2.3 Belastungsarten

Zur Belastung der Strukturmodelle werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt, deren Vor- und Nachteile im Folgenden erläutert werden.

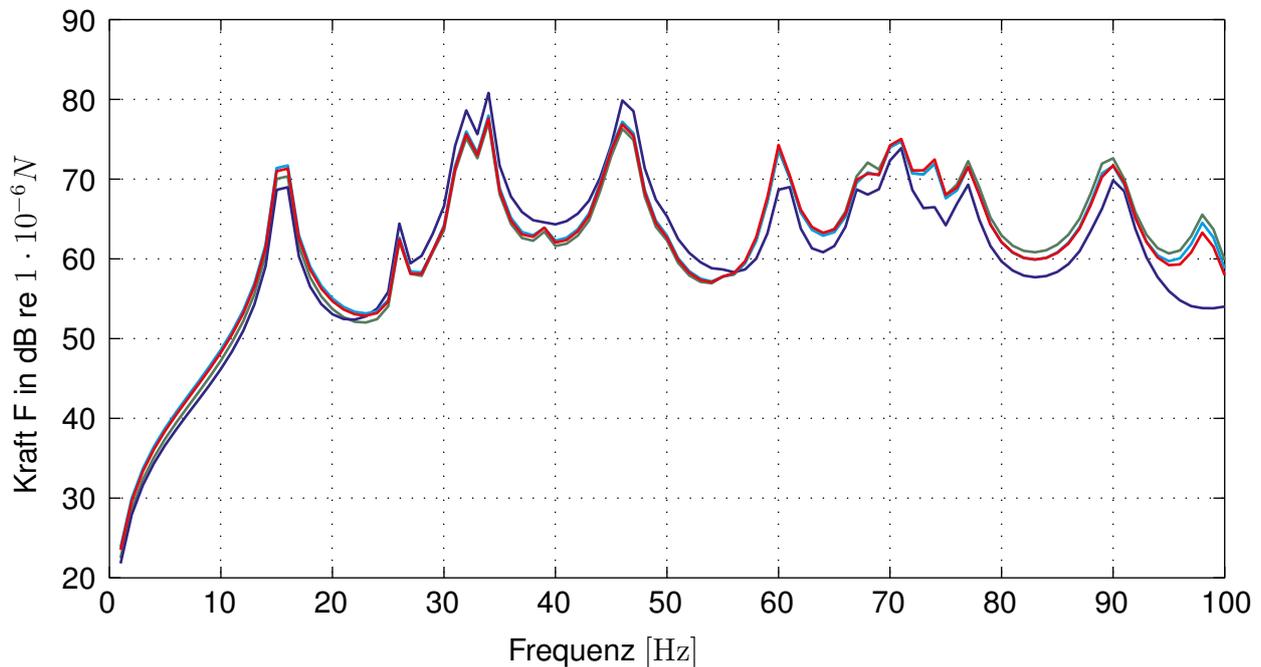
**Einzellast** Zur Simulation der in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Anregung mit einem elektrodynamischen Schwingerreger wird eine Einzellast aufgebracht. Dazu wird das jeweilige Strukturmodell in einem einzelnen Knoten belastet. Aufgrund des vorgegebenen Elementrasters wird die genaue Position des Schwingerregers auf der realen Struktur näherungsweise im FE-Modell

abgebildet. Für den Vergleich der gemessenen Daten mit dem numerischen Ergebnissen ist diese Belastungsart gut geeignet. Zur Ermittlung der Transferfunktionen wird für die Belastung der Wert 1.0 N angesetzt. Die resultierenden Spektren der Antwort in ausgewählten Auswertepunkten lassen sich dadurch direkt einheitenkonform vergleichen. Für eine generelle Aussage über die vibro-akustischen Eigenschaften des gesamten Deckensystems ist eine Betrachtung anhand einer Einzelast nur bedingt geeignet. Im zu untersuchenden Frequenzbereich bilden sich mehrere Eigenschwingformen aus. Bei einer Belastung durch eine Einzellast liegt je nach Lage des Lastangriffspunktes eine unterschiedliche Schwingantwort vor. Dadurch werden einzelne Moden nicht oder besonders stark angeregt, was die Aussage zum Schwingverhalten verfälscht. Um dieses Problem zu lösen, wird parallel ein stochastischer Ansatz gewählt.



**Abbildung 7.30:** Stochastische Flächenlast, Anregung im Ortsbereich

**Stochastischer Ansatz** Um eine gleichmäßige Anregung der Deckensysteme zu erhalten, wird eine stochastische Flächenlast aufgebracht. Dazu werden in jedem Knoten der Belastungsebene komplexe Einzellasten mit untereinander variierenden Phasen aufgebracht. Die Phasenlage ist gleichverteilt, der Betrag der Kräfte ist gleich. Bei gleichem Betrag werden dabei für jeden Knoten unterschiedliche Real- und Imaginärteile der jeweiligen Last durch Zufallszahlen bestimmt. Auf diese Weise wird eine zufällige Verteilung der jeweiligen Phasenwinkel erzielt. Die einzelnen Beträge werden so skaliert, dass die Gesamt-Resultierende bei jeder Berechnung den gleichen Wert annimmt. [Abbildung 7.30](#) zeigt ein FE-Modell mit statistischer Flächenlast. Die einzelnen Pfeile repräsentieren hierbei den Realteil der jeweiligen Einzellast.



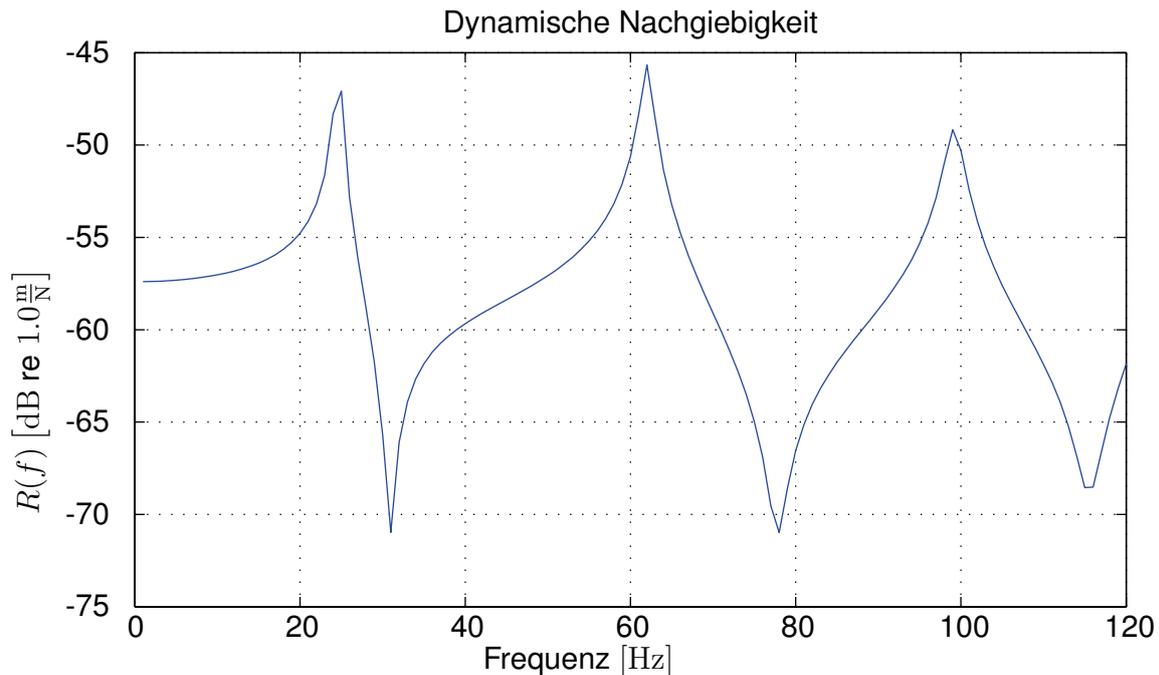
**Abbildung 7.31:** Stochastische Flächenlast, Ergebnisse im Frequenzbereich

Der zufällige Charakter der mit dieser Belastungsart erzielbaren Ergebnisse macht mehrere Wiederholungen der Berechnungen mit unterschiedlichen Zufallswerten notwendig. Die Mittelung über mehrere Simulationen führt zu verlässlichen Resultaten. In [Abbildung 7.31](#) sind die Ergebnisse der mittleren Quadrate der Antworten für unterschiedliche Anzahlen von Mittelungen im logarithmischen Maßstab abgebildet. Die starke Streuung bei wenigen Mittelungen ist klar zu erkennen. Erst ab 10 gemittelten Simulationen konvergieren die Resultate. Diese Belastungsart vermeidet ungleiche Anregungen von Moden und erhöht somit die Aussagefähigkeit der Resultate. Sie benötigt zwar einen erheblich höheren Rechenaufwand im Vergleich zur Einzellast, ist aber für die Aussagen zum System erforderlich.

#### 7.3.2.4 Weiterverarbeitung der Simulationsergebnisse

Einzelne Simulationsergebnisse können in ANSYS® über die grafische Benutzeroberfläche ausgegeben werden, das in [Abschnitt 7.4.1](#) beschriebene akustische Auswerteverfahren macht eine Schnittstelle zu MATLAB® notwendig.

**ANSYS® -Postprocessor** In ANSYS® können Frequenzgänge einzelner Auswertepunkte zur Vorauswertung und zur Ergebniskontrolle im Postprozessor grafisch dargestellt werden. Abbildung 7.32 zeigt exemplarisch das Amplitudenspektrum der Knotenverschiebung am Anregepunkt bei aufgebrachtener Einzellast. Da die Einzellast in jedem Frequenzschritt  $F(f) = 1.0 \text{ N}$  beträgt, entspricht dieses der dynamischen Nachgiebigkeit  $R(f) = \frac{w(f)}{F(f)}$ .



**Abbildung 7.32:** Dynamische Nachgiebigkeit am Anregepunkt

Für weitere Auswertungen ist ANSYS® jedoch weitgehend ungeeignet. Diese werden in MATLAB® durchgeführt.

**MATLAB® -Schnittstelle** Um einen automatisierten Ablauf der akustischen Auswertungen wie auch der mittleren Quadrate der Antworten (vgl. Abschnitt 7.3.2.3) in MATLAB® zu ermöglichen, müssen zunächst die Schwingformen aller Frequenzschritte übergeben werden. Dazu werden am Ende jeder Berechnung für jeden Frequenzschritt Real- und Imaginärteile der jeweiligen Schwingform nach Knotennummer sortiert und tabellarisch in Textdateien gespeichert. Zusätzlich wird eine weitere Textdatei mit den, der jeweiligen Knotennummer zugehörigen Knoten-Koordinaten erstellt. Dies ist notwendig, da die Knotennummern je nach Zusammensetzung und Abmessung der Strukturmodelle variieren, der geometrische Ort jedes Knoten für die spätere

Auswertung jedoch benötigt wird. Zur Erstellung der Textdateien werden Makros implementiert, welche die einzelnen Werte im Fortran-Format in die Textdateien schreiben. Dieses Format ist für MATLAB<sup>®</sup> lesbar und die Textdateien können für die weitere Auswertung als Vektoren importiert werden. Aus Verschiebungsvektoren und Geometriedaten können in MATLAB<sup>®</sup> frequenzabhängige Matrizen der Verschiebungsfelder erstellt werden, aus denen wiederum zum Beispiel die mittleren Quadrate der Antwortspektren in Abbildung 7.31 berechnet werden können.

### 7.3.3 Transiente dynamische Analyse (gehende Person)

Um die Strukturmodelle hinsichtlich ihrer Erschütterungsimmission beurteilen zu können, werden Berechnungen mit simulierter gehender Person durchgeführt. Da es sich dabei um eine transiente Belastung handelt und die Systemantwort im Zeitbereich benötigt wird, sind dazu transiente dynamische Analysen erforderlich. Als Zeitschrittintegrationsverfahren wird die *Newmark*-Beta Methode angewendet. Im hier beschriebenen Fall geschieht dies mit dem Ansatz konstanter Beschleunigungen Analysemethoden und Dämpfung werden analog zur harmonischen Analyse (s. Kapitel 7.3.2) gewählt. Die Belastungen werden als Last-Zeit-Funktionen aufgebracht, die nach Butz [10] und Kohrmann u. a. [30] in parametrischer Form erstellt und an das jeweilige Strukturmodell angepasst werden. Dabei spielen mehrere personenbezogene Parameter (Masse, Schrittweite, etc.) aber auch der Laufweg des Gehers eine Rolle.

#### 7.3.3.1 Fußgängerlast

Die parametrisierte Lastaufbringung zur Simulation eines Gehers macht eine differenzierte Vorgehensweise erforderlich. Zunächst muss der Verlauf der Last-Zeit-Funktion eines Auftritts ermittelt werden. Da dieser nach Butz [10] sowohl in seiner Form, als auch in der Dauer von der Schrittfrequenz abhängt, wird zunächst, wie in Kohrmann u. a. [30] gezeigt eine Matrix erstellt, in der die einzelnen Auftritte für relevante Schrittfrequenzen (1.2 Hz - 2.7 Hz in 0.1Hz-Schritten) gespeichert werden. Die Diskretisierung im Zeitbereich muss dabei mit der späteren Analyse übereinstimmen. Die Amplituden der Funktionen werden zunächst dimensionslos gewählt. In einem zweiten Schritt wird die Anzahl der Schritte ermittelt, die zum Überqueren der Decke benötigt werden. Dazu wird zunächst die Länge des Lastpfades in der gewählten Richtung aus den bekannten Geometrieparametern bestimmt. Im folgenden wird von einem Lastpfad in Decken-Längsrichtung ausgegangen. Aus der Schrittweite  $x_{\text{step}}$  und Anfangswert  $x_{\text{step,start}}$  lässt sich die

Anzahl der benötigten Schritte ermitteln. Mit dem Randabstand des Pfades  $y_{\text{step,edge}}$  können im Anschluss die Knoten identifiziert werden, die belastet werden sollen. Vereinfachend wird die Last in einem Knoten konzentriert und ein gerader Lastpfad gewählt. Für jeden der Knoten wird ein Lastvektor erstellt, dessen Dimension der Anzahl der Lastschritte entspricht. Als nächstes wird eine Schrittfrequenz  $f_{\text{step}}$  festgelegt und die korrespondierende Lastfunktion aus der oben genannten Matrix ausgelesen. Diese Lastfunktion wird den Lastvektoren der Anregepunkte in einem zeitlichen Versatz, der dem Kehrwert der Schrittfrequenz entspricht, überlagert. Zuletzt werden die Lastvektoren mit der Gewichtskraft des Gehers  $m_{\text{ped}} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  multipliziert.

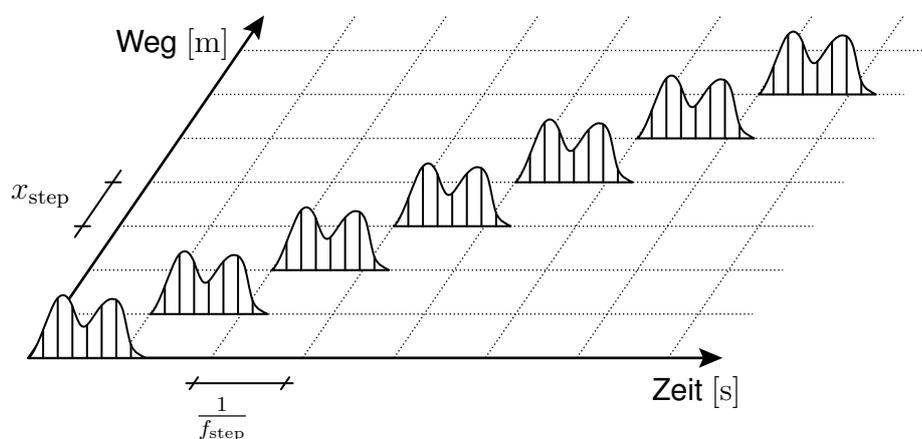
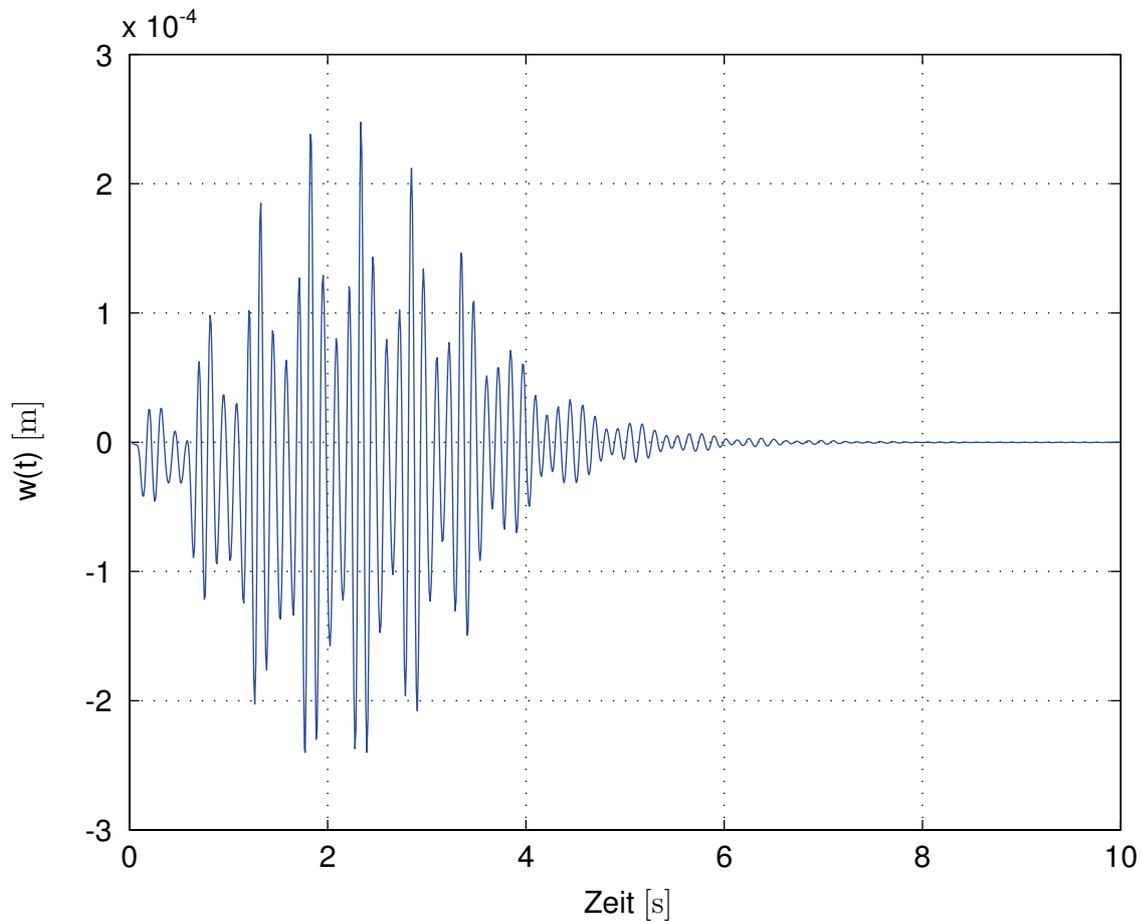


Abbildung 7.33: Prinzipskizze der Belastung mit dem Schritt-für-Schritt-Lastansatz [47]

### 7.3.3.2 Diskretisierung im Zeitbereich

Der Zeitbereich wird über die Zeitschrittgröße  $\Delta t$  und die Anzahl der Zeitschritte  $n_{\text{substep}}$  festgelegt. Daraus ergibt sich die Gesamtdauer der Analyse zu  $T_{\text{tot}} = \Delta t \cdot n_{\text{substep}}$ . Die Zeitschrittgröße muss dabei ausreichend klein gewählt werden, um numerische Fehler zu vermeiden. Hier wird  $\frac{T}{100}$  gewählt. Die Anzahl der Zeitschritte muss hingegen so groß gewählt werden, dass zum einen der Geher die Decke in Gänze überquert, aber die Decke im Anschluss ausschlagen kann. Beide Größen haben darüber hinaus Auswirkungen auf die ebenfalls geplante Auswertung im Frequenzbereich.



**Abbildung 7.34:** Beispiel für eine Schwingantwort eines Gehers mit 2 Hz Schrittfrequenz

### 7.3.3.3 Auswertung

Im Gegensatz zur harmonischen Analyse in Abschnitt 7.3.2 werden die Ergebnisse der transienten dynamischen Analyse lediglich über die grafische Benutzeroberfläche ausgegeben, da die Ergebnisse nur in ausgewählten Auswertepunkten im Zeitbereich betrachtet werden sollen. Für die weitere Auswertung werden einzelne Verläufe tabellarisch gespeichert und in MATLAB<sup>®</sup> importiert. Abbildung 7.34 zeigt exemplarisch den Verschiebungs-Zeit-Verlauf in Deckenmitte für einen Geher in Längsrichtung. Untersucht wird dabei eine Brettsper Holzdecke mit den Abmessungen der Teststruktur ohne Ausbauten. Dabei benötigt der Geher unter Annahme der in Tabelle 7.16 angegebenen Werte 7 Schritte zur Überquerung. Die Gesamtdauer  $T_{\text{tot}}$  beträgt 10 Sekunden.

**Tabelle 7.16:** Parameter transiente dynamische Analyse

| Parameter                        | Variable                | Wert   | Einheit |
|----------------------------------|-------------------------|--------|---------|
| Schrittweite                     | $x_{\text{step}}$       | 0.75   | [m]     |
| Randabstand des ersten Auftritts | $x_{\text{step,start}}$ | 0.375  | [m]     |
| Randabstand des Lastpfades       | $y_{\text{step,edge}}$  | 0.6875 | [m]     |
| Schrittfrequenz                  | $f_{\text{step}}$       | 2.0    | [Hz]    |
| Masse des Gehers                 | $m_{\text{ped}}$        | 75     | [kg]    |
| Zeitschrittgröße                 | $\alpha_{\text{R}}$     | 0.01   | [s]     |
| Anzahl Zeitschritte              | $\beta_{\text{R}}$      | 1000   | [s]     |

## 7.4 Auswertemodelle in MATLAB<sup>®</sup>

Die akustische und schwingungstechnische Bewertung der Strukturmodelle kann nicht direkt im ANSYS<sup>®</sup> -Postprocessor vorgenommen werden. Diese Auswertungen werden extern in MATLAB<sup>®</sup> mithilfe von spezifischen numerischen Auswertemodellen durchgeführt. Dazu müssen die Ergebnisse der harmonischen und transienten Analysen aus Abschnitt 7.3, aber auch die bei der Berechnung verwendeten Parameter importiert werden. Zur akustischen Bewertung wird ein Modell zur Prognose der abgestrahlten Schalleistung nach dem in Kapitel 6.2 beschriebenen semi-analytischen Verfahren erstellt. Zur Beurteilung der personeninduzierten Erschütterungen werden auf Grundlage der Simulationsdaten KB-Werte nach VDI2038 [56] erstellt. Abbildung 7.35 zeigt die Einbettung der Auswertemodelle in das komplette Ablaufschema der numerischen Modelle.

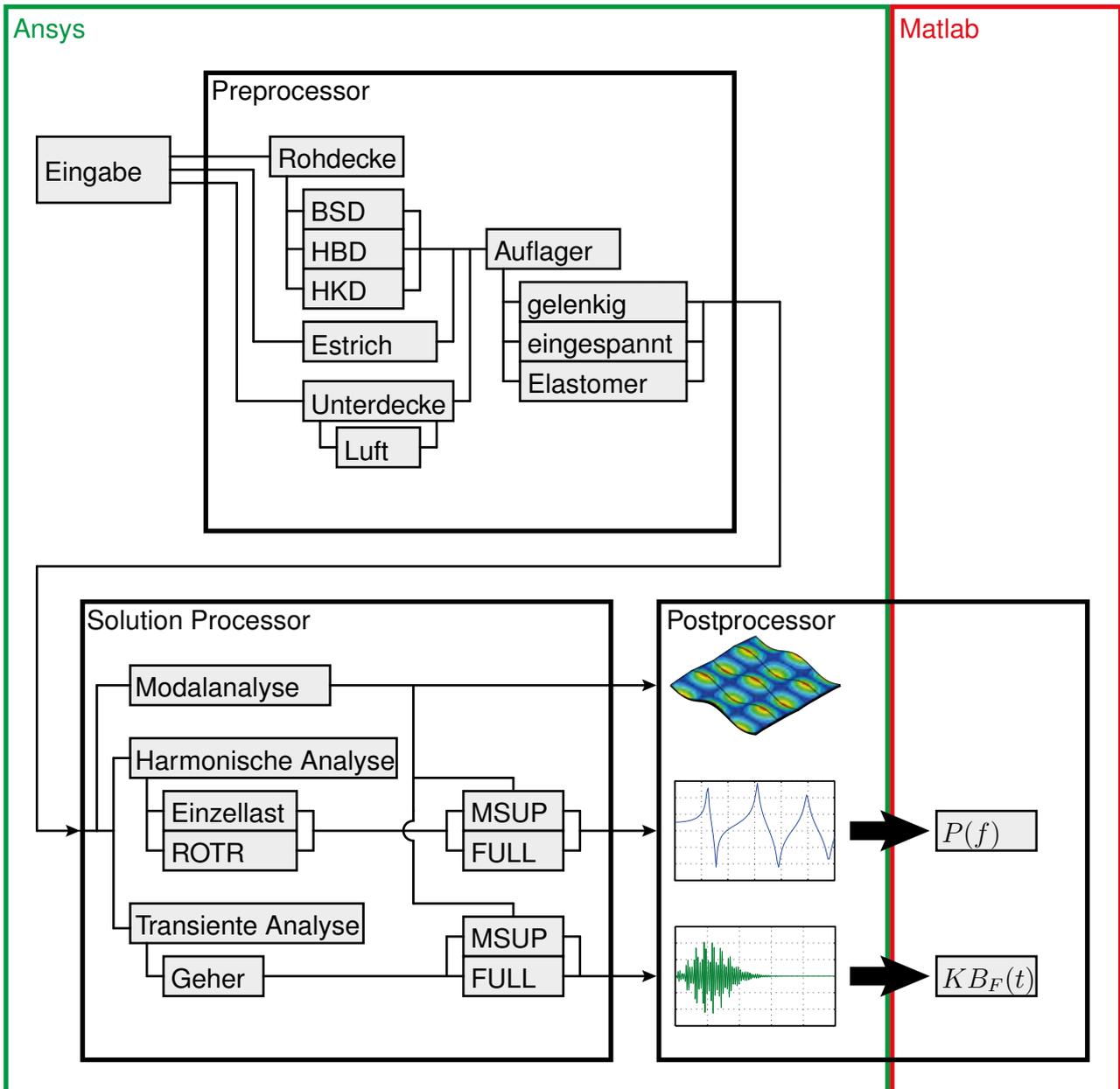


Abbildung 7.35: Modularer Aufbau

### 7.4.1 Modell zur Ermittlung der abgestrahlten Schalleistung

Die akustische Auswertung geschieht mithilfe der in Kapitel 6.2 vorgestellten Methode unter Verwendung von Integraltransformationmethoden (ITM). Dort wurde die Gleichung zur Ermittlung

der abgestrahlten Schalleistung  $P(f)$  aus dem Schnellefeld eines ebenen Strahlers

$$P(f) = \frac{1}{2} \frac{\rho_A c_A}{4\pi^2} \Re \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k_A}{\sqrt{k_A^2 - k_x^2 - k_y^2}} |\check{v}(k_x, k_y, f)|^2 dk_x dk_y \right] \quad (7.1)$$

mit

|                               |                                   |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| $\check{v}(k_x, k_y, \Omega)$ | Schnellefeld im Wellenzahlbereich |
| $\rho_A$                      | Luftdichte                        |
| $c_A$                         | Schallgeschwindigkeit             |
| $k_A = \frac{2\pi f}{c_A}$    | Wellenzahl der Luft               |
| $k_x, k_y$                    | Koordinaten im Wellenzahlbereich  |
| $f = \frac{\Omega}{2\pi}$     | Frequenz                          |

hergeleitet. Verglichen mit der effektiven abgestrahlten Schalleistung einer Kolbenmembran

$$P_{\text{eff}}(f) = \rho_A c_A \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |v(x, y, f)|^2 dx dy = \frac{1}{2} \frac{\rho_A c_A}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |\check{v}(k_x, k_y, f)|^2 dk_x dk_y \quad (7.2)$$

fällt auf, dass sich beide Gleichungen nur um den im Folgenden mit  $K$  bezeichneten Term

$$K(k_x, k_y, f) = \Re \left[ \frac{k_A}{\sqrt{k_A^2 - k_x^2 - k_y^2}} \right] \quad (7.3)$$

unterscheiden. Da die übrigen Terme in Gleichung 7.1 immer reelle Werte annehmen, ist nur dieser Term für eine Beschränkung auf den Realteil relevant. Diese Funktion  $K$  lässt sich mit  $\frac{k_x}{k_A} = r \cdot \cos(\phi)$  und  $\frac{k_y}{k_A} = r \cdot \sin(\phi)$  in Zylinderkoordinaten darstellen,

$$K(r, \phi, f) = \Re \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - r^2}} \right] \quad (7.4)$$

wobei gilt:

$$\begin{aligned} K(r, \phi, f) &\rightarrow \infty && \text{für } r \rightarrow 1 \\ K(r, \phi, f) &= 0 && \text{für } r > 1 \end{aligned}$$

Das Integral dieser Funktion konvergiert über den gesamten Wellenzahlbereich und berechnet

sich zu:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Re \left[ \frac{k_A}{\sqrt{k_A^2 - k_x^2 - k_y^2}} \right] dk_x dk_y = k_A^2 \cdot \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \Re \left[ \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \right] d\phi dr = 2\pi k_A^2$$

Anschaulich lässt sich  $K$  demnach als kreisförmige „Schale“ beschreiben, deren Rand gegen unendlich strebt. Außerhalb eines Kreises, dessen Radius der Wellenzahl der Luft  $k_A$  entspricht, nimmt der Integrand imaginäre Werte an, weshalb die Funktion dort durch die Beschränkung auf den Realteil zu null gesetzt wird. Eine Integration der Gleichung 7.3 und damit auch 7.1 liefert für den gesamten Frequenzbereich trotz der Singularität endliche Werte. Analytisch lässt sich der Einfluss dieses Terms somit gut erfassen, numerisch ergeben sich daraus jedoch Probleme, auf die im folgenden näher eingegangen wird.

Zur Erstellung eines numerischen Modells muss

$$P(f) = \frac{1}{2} \frac{\rho_{ACA}}{4\pi^2} \Re \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} K(k_x, k_y, f) \cdot |\check{v}(k_x, k_y, f)|^2 dk_x dk_y \right] \quad (7.5)$$

in eine numerischen Ausdruck umgeformt werden.  $P(f)$  wird somit zu einem Vektor  $\mathbf{p}$ ,  $K$  und  $\check{v}$  zu den dreidimensionalen  $n_{k_x} \times n_{k_y} \times n_f$ -Matrizen  $\mathbf{K}$  und  $\check{\mathbf{V}}$ .

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_\gamma \\ p_{n_f} \end{bmatrix}, \mathbf{K}_\gamma = \begin{bmatrix} k_{11\gamma} & k_{1\beta\gamma} & k_{1n_{k_y}\gamma} \\ k_{\alpha 1\gamma} & k_{\alpha\beta\gamma} & k_{\alpha n_{k_y}\gamma} \\ k_{n_{k_x}1\gamma} & k_{n_{k_x}\beta\gamma} & k_{n_{k_x}n_{k_y}\gamma} \end{bmatrix}, \check{\mathbf{V}}_\gamma = \begin{bmatrix} \check{v}_{11\gamma} & \check{v}_{1\beta\gamma} & \check{v}_{1n_{k_y}\gamma} \\ \check{v}_{\alpha 1\gamma} & \check{v}_{\alpha\beta\gamma} & \check{v}_{\alpha n_{k_y}\gamma} \\ \check{v}_{n_{k_x}1\gamma} & \check{v}_{n_{k_x}\beta\gamma} & \check{v}_{n_{k_x}n_{k_y}\gamma} \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

Die einzelnen Einträge in  $\mathbf{p}$  lassen sich numerisch als Summen beschreiben:

$$p_\gamma = \frac{1}{2} \frac{\rho_{ACA}}{4\pi^2} \Delta k_x \Delta k_y \Re \left[ \sum_{\alpha=1}^{n_{k_x}} \sum_{\beta=1}^{n_{k_y}} k_{\alpha\beta\gamma} \cdot \check{v}_{\alpha\beta\gamma} \cdot \check{v}_{\alpha\beta\gamma}^* \right] \quad (7.7)$$

Die Einträge des Schnellmatrix im Wellenzahlbereich  $\check{\mathbf{V}}$  werden aus den importierten Simulationsdaten ermittelt. Die harmonischen Analysen liefern dabei zunächst die diskreten Verschiebungsfelder je Frequenzschritt als dreidimensionale  $n_x \times n_y \times n_f$ -Matrix  $\mathbf{U}$ . Die Schnellmatrix im Ortsbereich  $\mathbf{V}$  für den Frequenzschritt  $\gamma$  kann daraus durch Multiplikation mit  $i2\pi\gamma\Delta f$  ermittelt

werden.

$$\mathbf{V}_\gamma = i2\pi\gamma\Delta f \cdot \mathbf{U}_\gamma = i2\pi\gamma\Delta f \cdot \begin{bmatrix} u_{11\gamma} & u_{1\beta\gamma} & u_{1n_y\gamma} \\ u_{\alpha 1\gamma} & u_{\alpha\beta\gamma} & u_{\alpha n_y\gamma} \\ u_{n_x 1\gamma} & u_{n_x\beta\gamma} & u_{n_x n_y\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11\gamma} & v_{1\beta\gamma} & v_{1n_y\gamma} \\ v_{\alpha 1\gamma} & v_{\alpha\beta\gamma} & v_{\alpha n_y\gamma} \\ v_{n_x 1\gamma} & v_{n_x\beta\gamma} & v_{n_x n_y\gamma} \end{bmatrix}$$

Die Dimensionen von  $\mathbf{V}$  entsprechen der Diskretisierung der FE-Modelle aus Abschnitt 7.2.1

$$n_x = \frac{l}{e_{\text{size},x}} + 1, \quad n_y = \frac{w_{\text{tot}}}{e_{\text{size},y}} + 1, \quad n_f = \frac{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}{\Delta f}.$$

Eine zweidimensionale Schnelle Fouriertransformation (FFT) je Frequenzschritt  $\gamma$  liefert im Anschluss die Schnellmatrix im Wellenzahlbereich  $\check{\mathbf{V}}$ . Abbildung 7.36 zeigt exemplarisch die Schnelleverteilung im Orts- und Wellenzahlbereich für eine allseitig gelenkig gelagerte Platte (1.0m  $\times$  1.0m,  $\Delta x = 0.05\text{m}$ ,  $\Delta y = 0.05\text{m}$ ) im Bereich der dritten Biege-Eigenfrequenz ( $\gamma = 100$ ,  $\Delta f = 1\text{Hz}$ ).

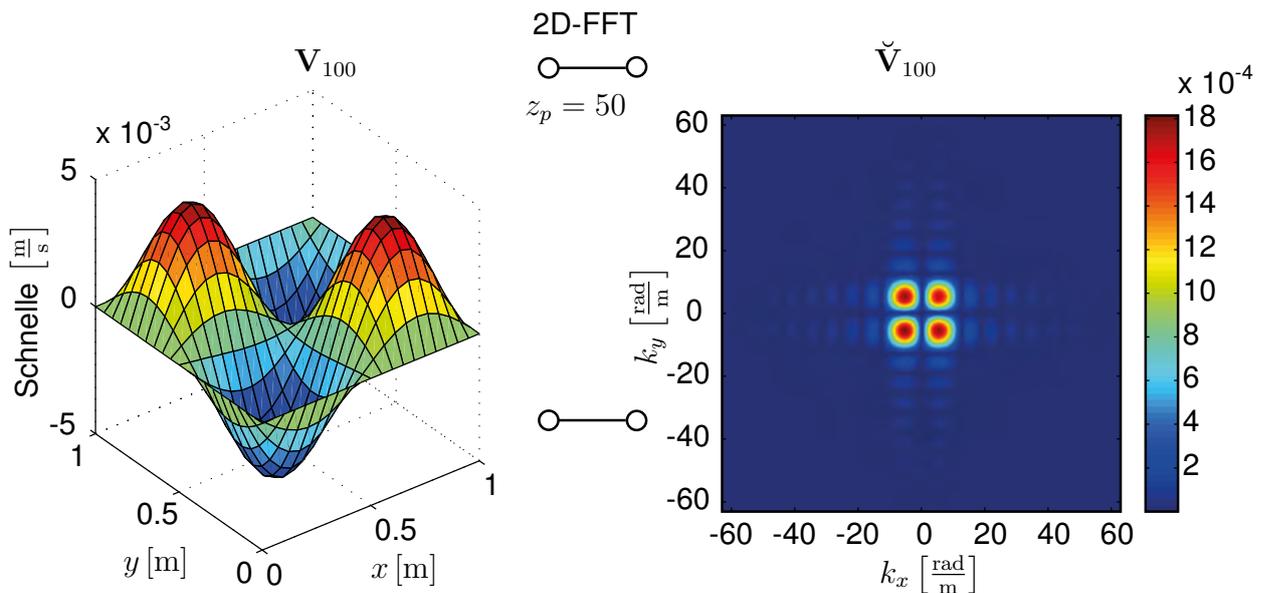


Abbildung 7.36: Fouriertransformation

Zur Verbesserung der Auflösung im Wellenzahlbereich werden die Schnellefelder im Ortsbereich um den Faktor  $z_p$  erweitert, wobei der Bereich außerhalb des ursprünglichen Schnellefeldes zu Null gesetzt wird (engl. Zero-Padding). Anschaulich bedeutet dies, dass die schwingende Oberfläche in einer deutlich größeren ruhenden Fläche angenommen wird, was eine gute Näherung

darstellt, da diese beim Vergleich unterschiedlicher Systeme geringe Relevanz hat. Die Dimensionen  $n_{k_x}$  und  $n_{k_y}$  von  $\check{V}_\gamma$  ergeben sich somit zu

$$n_{k_x} = z_p \cdot (n_x - 1) + 1 = z_p \left( \frac{l}{e_{\text{size},x}} \right) + 1, \quad n_{k_y} = z_p \cdot (n_y - 1) + 1 = z_p \left( \frac{w_{\text{tot}}}{e_{\text{size},y}} \right) + 1$$

und damit die Wellenzahlschrittweiten  $\Delta k_x$  und  $\Delta k_y$  zu

$$\Delta k_x = \frac{2\pi}{z_p l}, \quad \Delta k_y = \frac{2\pi}{z_p w_{\text{tot}}}. \quad (7.8)$$

Die Matrixeinträge von  $\mathbf{K}$  werden wie folgt berechnet:

$$k_{\alpha\beta\gamma} = \frac{\left( \frac{2\pi f_\gamma}{c_A} \right)^2}{\sqrt{\left( \frac{2\pi f_\gamma}{c_A} \right)^2 - k_{x,\alpha}^2 - k_{y,\beta}^2}}. \quad (7.9)$$

Darin repräsentieren  $k_{x,\alpha}$ ,  $k_{y,\beta}$  und  $f_\gamma$  die jeweiligen Einträge der Vektoren der Koordinatenachsen

$$\mathbf{k}_x = \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha \\ n_{k_x} \end{bmatrix} \cdot \Delta k_x - \frac{n_{k_x} + 1}{2} \Delta k_x = \begin{bmatrix} -\frac{\pi}{\Delta x} \\ \vdots \\ \frac{\pi}{\Delta x} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{k}_y = \begin{bmatrix} 1 \\ \beta \\ n_{k_y} \end{bmatrix} \cdot \Delta k_y - \frac{n_{k_y} + 1}{2} \Delta k_y = \begin{bmatrix} -\frac{\pi}{\Delta y} \\ \vdots \\ \frac{\pi}{\Delta y} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} 1 \\ \gamma \\ n_f \end{bmatrix} \cdot \Delta f.$$

Die Abbildungen 7.37 und 7.38 zeigen Ausschnitte aus  $\mathbf{K}_{100}$  (bei 100 Hz) für einen Zero-Padding-Faktor  $z_p = 40$ .

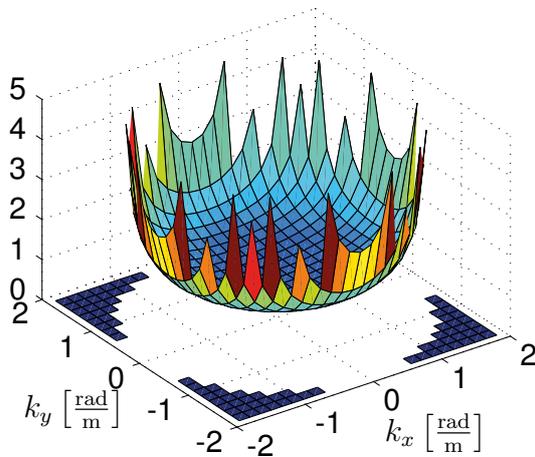


Abbildung 7.37: K in 3D zp=40 100Hz

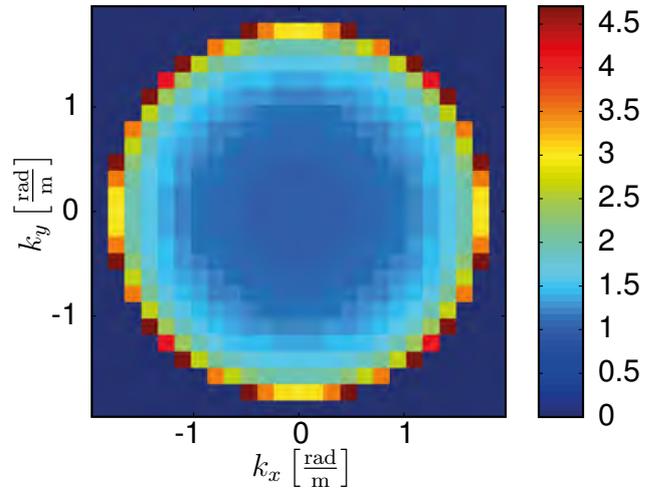


Abbildung 7.38: K in 2D zp=40 100Hz

Durch die Diskretisierung ergeben sich unterschiedlich starke Sprünge im Bereich der Wellenzahl der Luft  $k_A$ . Da diese mit zunehmender Frequenz linear ansteigt, nimmt sobald

$$k_{x,\alpha}^2 + k_{y,\beta}^2 > k_{A,\gamma}^2$$

auch die Anzahl der Matrixeinträge ungleich Null in  $\mathbf{K}$  zu. Dies gilt dementsprechend auch für das Produkt der Matrizen  $\mathbf{K} \cdot \check{\mathbf{V}} \cdot \check{\mathbf{V}}^*$  zur Berechnung der abgestrahlten Schalleistung beschrieben durch den Vektor  $\mathbf{p}$  (s. Glg. 7.6). Die korrespondierenden Matrixeinträge in  $\check{\mathbf{V}}_{100} \cdot \check{\mathbf{V}}_{100}^*$  zeigt Abbildung 7.39.

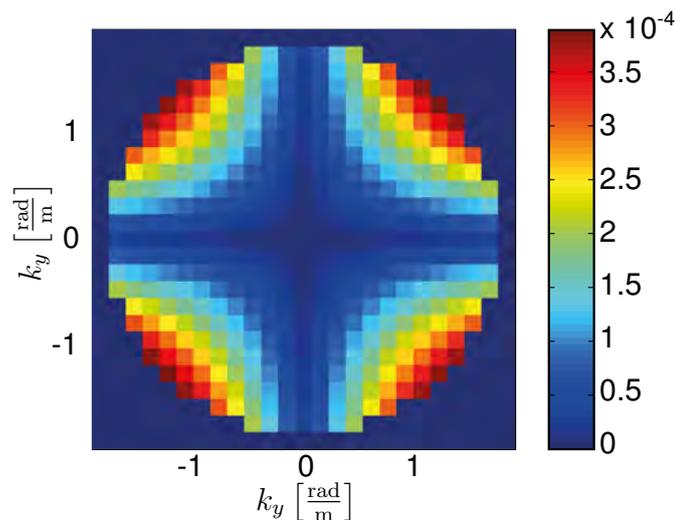
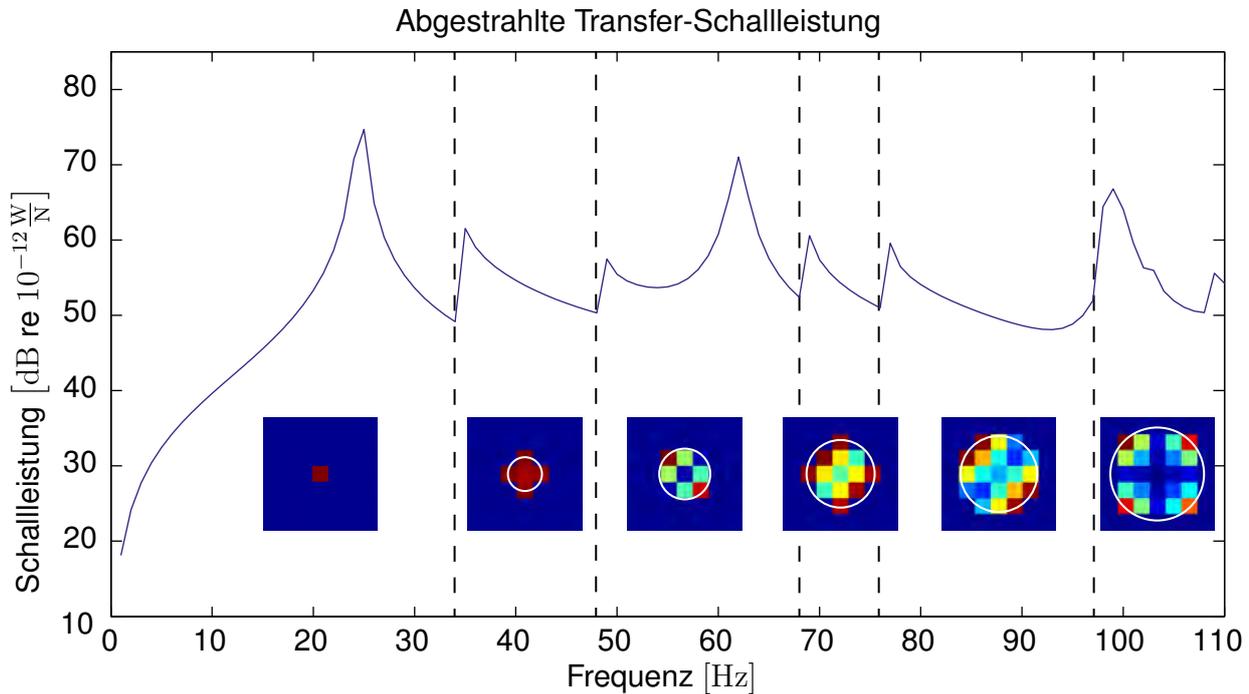


Abbildung 7.39: Ausschnitt

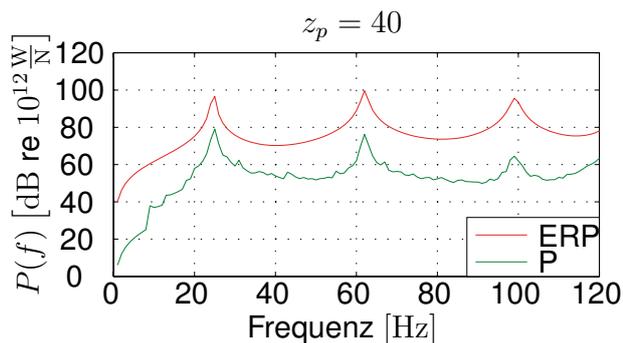


**Abbildung 7.40:** „Sprünge“ im Verlauf der Schalleistung aufgrund numerischer Artefakte

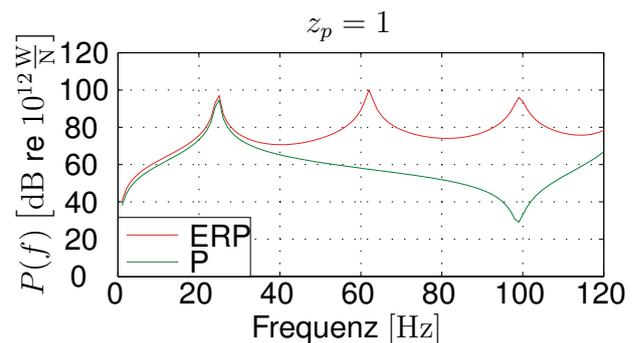
Daraus ergeben sich zwischen bestimmten Frequenzschritten ebenfalls „Sprünge“ im Verlauf der abgestrahlten Schalleistung  $P(f)$ . In Abbildung 7.40 ist der Schalleistungspegel der oben genannten Platte für einen Zero-Padding-Faktor  $z_p = 10$  dargestellt. Die Sprünge sind durch gestrichelte Linien markiert. Zwischen den Sprüngen bleibt die Anzahl der Matrixeinträge ungleich Null konstant, weshalb dort ein kontinuierlicher Verlauf erzeugt werden kann. Die zugehörigen Matrizen sind für jeden Bereich unter dem Graph abgebildet, wobei die jeweilige Wellenzahl der Luft nach jedem Sprung durch weiße Kreise angedeutet wird. Problematisch bei diesem Resultat ist weiterhin, dass die Eigenfrequenzen der Platte bei etwa 25 Hz, 63 Hz und 100 Hz bei dieser Diskretisierung nur schwer von den numerischen Artefakten an den „Sprüngen“ zu unterscheiden sind.

Eine Möglichkeit zur Reduzierung dieses Effekts besteht darin, den Zero-Padding-Faktor  $z_p$  zu erhöhen, wobei der Rechenaufwand dabei exponentiell anwächst. In Abbildung 7.41 sieht man eine deutliche Reduktion der Artefakte bei  $z_p = 40$ . Um einen annähernd kontinuierlichen Verlauf zu erreichen ist ein deutlich höheres  $z_p$  erforderlich. Zum Vergleich ist in Abbildung 7.41 das Ergebnis der selben Daten mit  $z_p = 1$  dargestellt. Während  $P(f)$  in den Abbildungen 7.40 und 7.41 noch im Bereich der Eigenfrequenzen korrekte Resultate liefern, sieht man hier, dass die zweite und dritte Eigenfrequenz nicht erfasst werden können. Ebenfalls tritt im betrachteten

Frequenzbereich kein „Sprung“ im Verlauf auf, die Matrix  $\mathbf{K}$  besteht hier also nur aus einem Eintrag größer Null. Empirisch lässt sich ermitteln, dass  $z_p \cong 10$  die untere mögliche Grenze für das Verfahren darstellt. Es liegt nahe, dass ein mathematischer Zusammenhang zwischen  $z_p$  und der Wellenzahl der jeweiligen Eigenmoden zur Ermittlung eines Grenzwertes besteht, der im Rahmen dieses Projekts jedoch nicht näher untersucht wird. Auf die Berechnung der effektiven abgestrahlten Leistung (ERP) hat der Faktor  $z_p$  keinen Einfluss.



**Abbildung 7.41:** Studie zur Reduktion numerischer Artefakte  $z_p = 40$



**Abbildung 7.42:** Studie zur Reduktion numerischer Artefakte  $z_p = 1$

Zur Verbesserung der Resultate bei gleichzeitiger Begrenzung der Rechendauer muss ein anderer Lösungsweg verfolgt werden. Mit  $z_p > 10$  sind die numerischen Probleme, die aus der Diskretisierung der Schwingungsschnelle  $\ddot{\mathbf{v}}$  resultieren weitgehend ausgeschlossen, die weitere Problematik bezieht sich demnach auf die Matrix  $\mathbf{K}$ . Besonders kritisch wirkt sich hier aus, dass aufgrund der Form der Funktion mit größer werdendem  $k_A$  die neuen Einträge in  $\mathbf{K}$  in jedem Fall vergleichsweise große Werte annehmen, was den Effekt zusätzlich verstärkt. Vor allem die Stellen an denen die Funktion unendlich große Werte annimmt müssen bei der Berechnung ausgeschlossen werden. Dies ist immer dann der Fall wenn gilt:

$$k_{x,\alpha}^2 + k_{y,\beta}^2 \stackrel{!}{=} k_{A,\gamma}^2.$$

Zum Lösen dieser Problematik wird im Bereich jedes  $k_{\alpha\beta\gamma}$  die Auflösung im Wellenzahlbereich

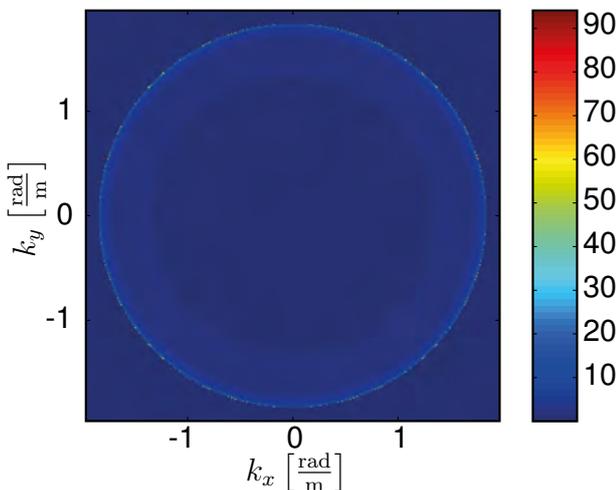
um einen Faktor  $n_r$  verfeinert. Dazu werden dort jeweils die Vektoren  $\mathbf{k}_{xr}$  und  $\mathbf{k}_{yr}$  definiert.

$$\mathbf{k}_{xr} = \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha_r \\ n_r \end{bmatrix} \cdot \frac{\Delta k_x}{n_r} - \frac{n_r + 1}{2} \frac{\Delta k_x}{n_r} \quad \text{für } n_r = 3 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{k}_{x3} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} \\ 0 \\ \frac{1}{3} \end{bmatrix} \Delta k_x$$

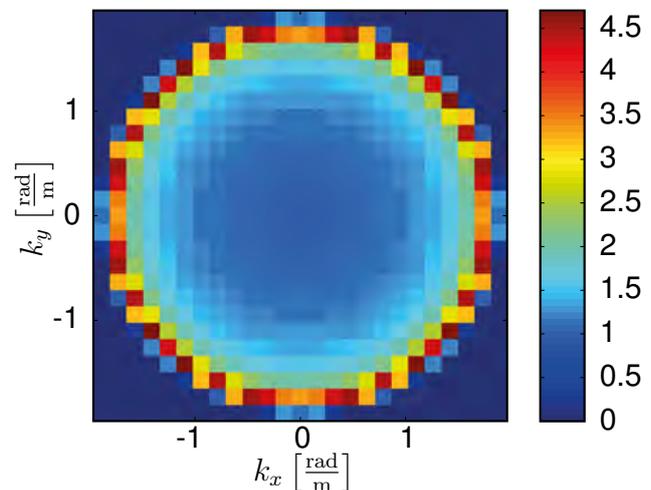
$$\mathbf{k}_{yr} = \begin{bmatrix} 1 \\ \beta_r \\ n_r \end{bmatrix} \cdot \frac{\Delta k_y}{n_r} - \frac{n_r + 1}{2} \frac{\Delta k_y}{n_r} \quad \text{für } n_r = 3 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{k}_{y3} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} \\ 0 \\ \frac{1}{3} \end{bmatrix} \Delta k_y$$

Am Beispiel für  $n_r = 3$  wird diese Verfeinerung veranschaulicht. Die  $n_{k_x} \times n_{k_y}$ -Matrix  $\mathbf{K}_\gamma$  wird dementsprechend um Werte zwischen den ursprünglichen Werten ergänzt wodurch eine  $n_r \cdot n_{k_x} \times n_r \cdot n_{k_y}$ -Matrix gebildet wird. Abbildung 7.43 zeigt diese für  $z_p = 40$  und  $n_r = 15$ . Zur Multiplikation mit  $\check{\mathbf{V}}$  müssen die Dimensionen wiederum reduziert werden. Dazu wird für jede Kombination aus  $\alpha$  und  $\beta$  aus einem Bereich von  $n_r \times n_r$ -Werten der Mittelwert gebildet.

$$\bar{k}_{\alpha\beta\gamma} = \frac{1}{n_r^2} \sum_{\alpha_r=1}^{n_r} \sum_{\beta_r=1}^{n_r} \frac{\left(\frac{2\pi f_\gamma}{c_A}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{2\pi f_\gamma}{c_A}\right)^2 - (k_{x,\alpha} + k_{xr,\alpha_r})^2 - (k_{y,\beta} + k_{yr,\beta_r})^2}}. \quad (7.10)$$



**Abbildung 7.43:** Matrix  $\mathbf{K}_\gamma$  nach Verfeinerung für  $z_p = 40$  und  $n_r = 15$

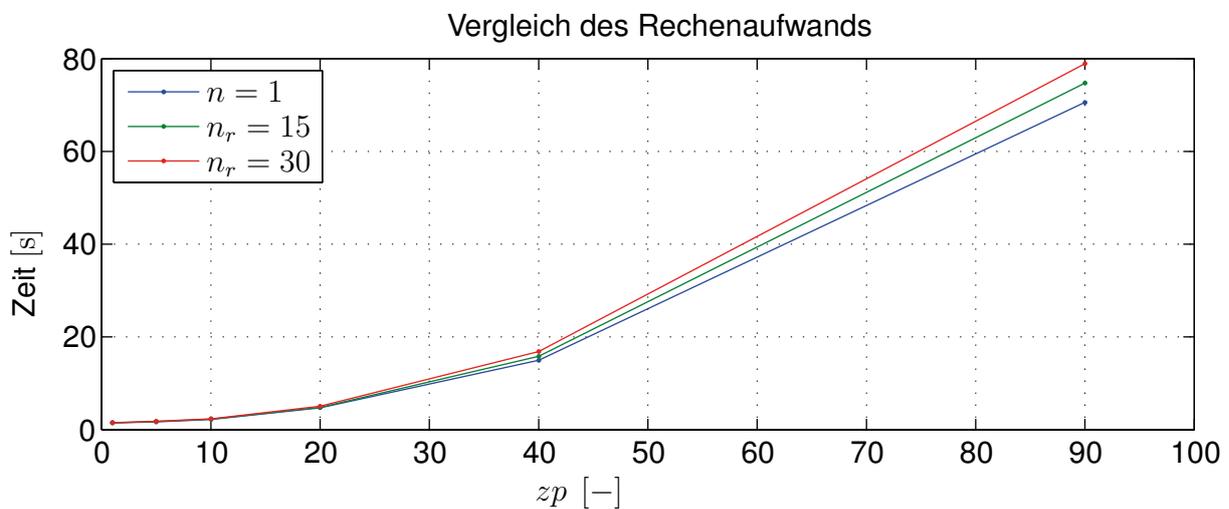


**Abbildung 7.44:** Matrix  $\bar{\mathbf{K}}$  nach Reduktion durch Mittelung gemäß Gl. (7.10)

Die so erstellte Matrix  $\bar{\mathbf{K}}$  hat gegenüber  $\mathbf{K}$  einen geglätteten Verlauf, sowohl bei zweidimensionaler Betrachtung eines einzelnen Frequenzschritts (s. Abb. 7.43) als auch beim Vergleich

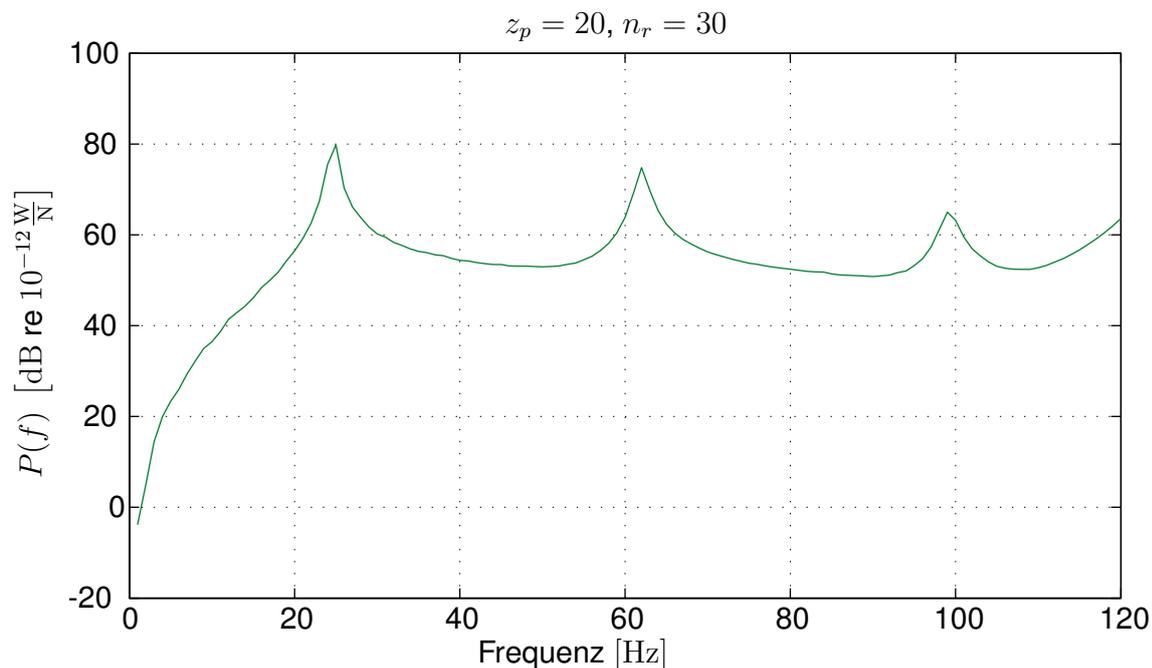
mehrerer Frequenzschritte. Im letzteren Fall ist dies auf den nur langsamen Anstieg des Mittelwertes bei zunehmender Wellenzahl der Luft  $k_A$  zurückzuführen.

Ein Vergleich des Rechenaufwand für die Verfeinerung im Vergleich zur Erhöhung des Zero-Padding-Faktors zeigt das Diagramm in Abbildung 7.45. Dabei wurden auf dem selben Rechner Berechnungen mit unterschiedlichen Werten für  $z_p$  und  $n_r$  zur Prognose der abgestrahlten Schalleistung auf Grundlage gleicher Daten durchgeführt. Zu erkennen ist der exponentielle Anstieg des Rechenaufwands mit steigendem  $z_p$ , wohingegen der Aufwand für die Verfeinerung linear anwächst und auch in Relation klein bleibt. Eine Aussage über die Güte der Ergebnisse kann hier noch nicht getroffen werden.



**Abbildung 7.45:** Exponentieller Anstieg des Rechenaufwands mit steigendem  $z_p$  bei linearem Anstieg für die Verfeinerung  $n_r$ .

Ein Vergleich der Resultate zeigt ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Rechenaufwand und Ergebnisqualität bei  $z_p = 20$  und  $n_r = 30$ . Den Schalleistungspegel für diese Einstellungen zeigt Abbildung 7.46.



**Abbildung 7.46:** Exemplarische Darstellung des Schalleistungspegels für die Konfiguration  $z_p = 20$  (Zero-Padding) und  $n_r = 30$  (Verfeinerung der Funktion  $K$ )

Eine Verifizierung des Verfahrens wird in Kapitel 8.1 vorgenommen. Zudem ist eine analytische Lösung durch Faltung und modale Superposition der Eigenmoden einer Platte denkbar. Die zunächst naheliegende Überlegung, die oben beschriebene Problematik durch eine Transformation in zylindrische Koordinaten zu umgehen hat sich als nicht zielführend erwiesen. Dadurch werden die „Sprünge“ sogar verstärkt.

## 7.4.2 Bestimmung von KB-Werten

Um die mithilfe der transienten Analysen in Abschnitt 7.3.3 simulierten personeninduzierten Erschütterungen bewerten zu können, wird ein weiteres numerisches Modell in ANSYS® erstellt. Dieses adaptiert das in 4150-2 [1] beschriebene analoge Verfahren zur Bewertung von Erschütterungen, die in Gebäuden auf Menschen einwirken, für die Verwendung von Simulationsdaten.

Dazu werden zunächst unbewertete Schnellesignale  $v(t)$  aus den in ANSYS® ermittelten diskreten Verschiebungs-Zeit-Verläufen ermittelt. Diese Daten werden mithilfe einer FFT in den

Frequenzbereich transformiert, das beidseitige Spektrum wird anschließend mit  $i2\pi f$  multipliziert und zurück transformiert.

Bei der Bewertung von Messdaten werden die Signale in  $v(t)$  gemäß DIN45669-1 [14] analog band-begrenzt und mit einem Bewertungsfiter beaufschlagt. Die so ermittelte Bewertungsschwinggeschwindigkeit  $v_B(t)$  wird durch Normierung auf  $1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  in das dimensionslose KB-Signal  $KB(t)$  überführt.

Die Frequenzbewertung der KB-Signale besteht aus Bandbegrenzung und Bewertungsfiter, die unabhängig voneinander angesetzt werden. Zur Bandbegrenzung wird das unbewertete Signal mit dem komplexen Frequenzgang  $H_u(f)$  multipliziert.

$$H_u(f) = \frac{1}{\left[1 - i\sqrt{2}\frac{0.8f_u}{f} - \left(\frac{0.8f_u}{f}\right)^2\right] \cdot \left[1 + i\sqrt{2}\frac{0.8f}{f_o} - \left(\frac{0.8f}{f_o}\right)^2\right]} \quad (7.11)$$

Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus einem zweipoligen Hochpassfilters und einem zweipoligen Tiefpassfilter, wobei im allgemeinen Fall der Bereich von  $f_u = 1$  Hz bis  $f_o = 80$  Hz angesetzt wird.

Die Frequenzbewertung wird durch einen Hochpassfilter bei  $f_0 = 5.6$  Hz vorgenommen [57]. Der zugehörige Amplitudenfrequenzgang lautet:

$$|H_{KB}(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}} \quad (7.12)$$

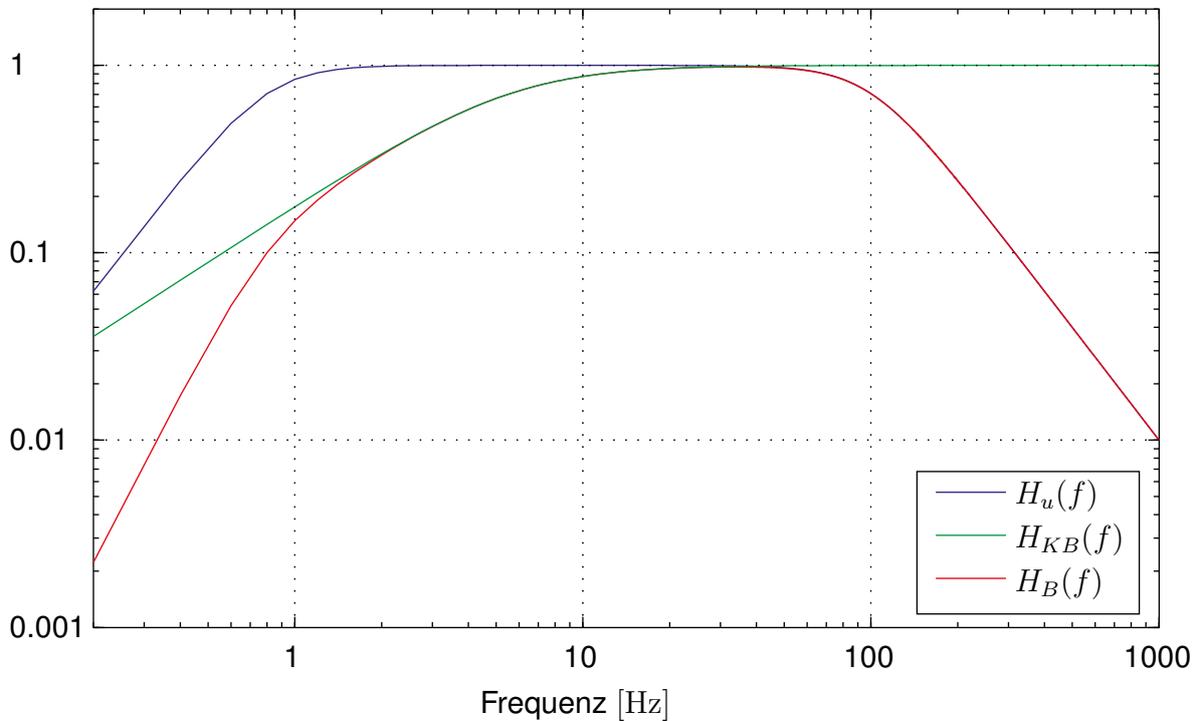
$$H_{KB}(f) = \frac{1}{1 - i\frac{f_0}{f}} \quad (7.13)$$

Werden Bandbegrenzung und Frequenzbewertung kombiniert, ergibt sich der komplexe Frequenzgang

$$H_B(f) = H_{KB}(f) \cdot H_u(f) \quad (7.14)$$

In Abbildung 7.47 sind die Amplitudenfrequenzgänge der Filter im doppelt logarithmischen Maßstab abgebildet. Da die Simulationsdaten weder durch Aliasing-Effekte noch durch tieffrequente Störsignale beeinflusst sind, kann auf die Bandbegrenzung verzichtet werden. Um ein möglichst

genaues Modell zum Vergleichen mit Messdaten zu erhalten, wird dennoch der kombinierte Filter  $H_B(f)$  auf die simulierten Schnellesignal angewandt.

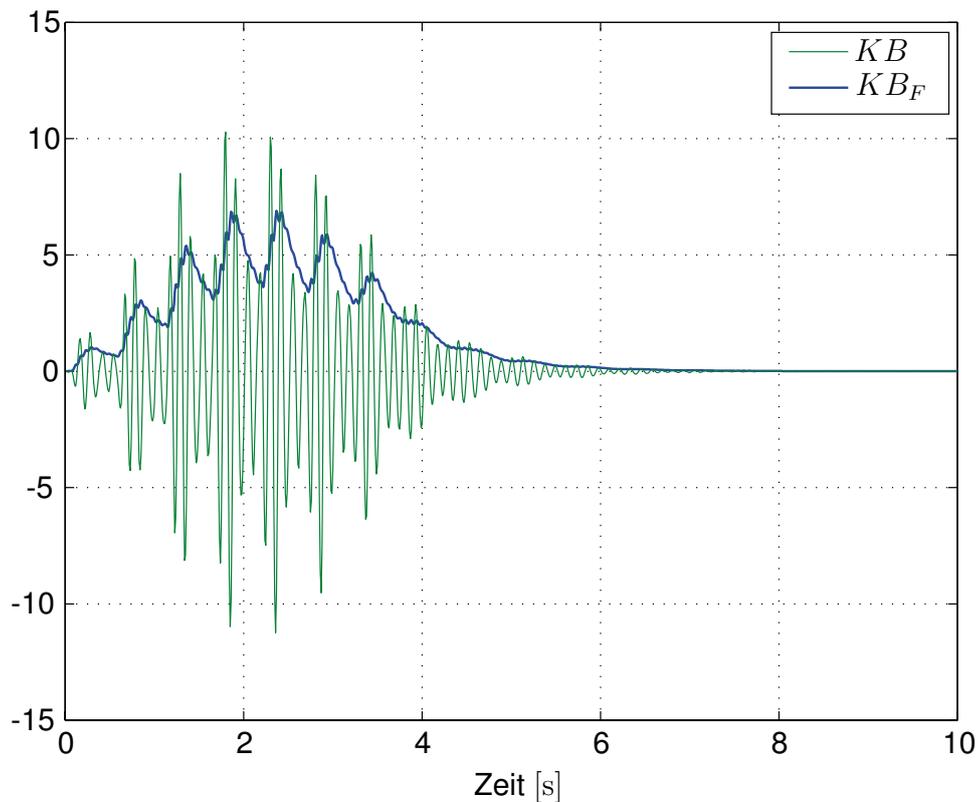


**Abbildung 7.47:** Amplitudenfrequenzgänge der Bewertungs- und Bandbegrenzungsfilter

Aus dem frequenzbewerteten  $KB$ -Signal wird anschließend durch Bildung eines gleitenden Effektivwertes die bewertete Schwingstärke  $KB_F(t)$  ermittelt. Allgemein lautet die Gleichung dafür:

$$KB_\tau(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\xi}^t e^{-\frac{t-\xi}{\tau}} KB^2(\xi) d\xi} \quad (7.15)$$

Im speziellen Fall wird für die Zeitkonstante  $\tau$  ein Wert von 0.125 s gewählt. Dieser Wert wird durch den Index  $F$  (Abkürzung für das englische Wort „fast“) angezeigt. Anhand des Maximalwertes  $KB_{Fmax}$  können sodann nach VDI2038 [56] Bewertungen vorgenommen werden.



**Abbildung 7.48:**  $KB$ - und  $KB_F$ -Signal eines Geher mit 2 Hz Schrittfrequenz

Als abschließendes Beispiel wird in [Abbildung 7.48](#) das  $KB$ -Signal und die zugehörige bewertete Schwingstärke  $KB_F(t)$  für einen simulierten Geher dargestellt. Das Strukturmodell besteht dort aus einer zweiseitig gelagerten, einachsig gespannten Brettsper Holzdecke vom Typ Leno 105 ( $5.5 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$ ) bestehend aus vier Einzelplatten. Der Geher hat eine Masse von 75 kg und überschreitet die Decke in Längsrichtung mittig auf der ersten Einzelplatte in sieben Schritten. Für diese Konfiguration werden die Grenzwerte nach VDI2038 [\[56\]](#) nicht eingehalten (siehe [Tabelle 7.17](#)).

**Tabelle 7.17:** Anhaltswerte für Geschosdecken im Wohn- und Industriebau nach VDI2038 [\[56\]](#)

| Komfortniveau               | $KB_{Fmax}$ -Werte            |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Hoher Komfort               | $KB_{Fmax} < 0.2$             |
| Mittlerer Komfort           | $0.2 \leq KB_{Fmax} \leq 1.0$ |
| Geringer Komfort/Unwohlsein | $1.0 \leq KB_{Fmax} \leq 2.5$ |

# 8 Validierung und Kalibrierung der numerischen Modelle

In Kapitel 7 werden die im Rahmen dieses Forschungsprojekts erstellten numerischen Modelle vorgestellt. Um Fehler bei der Modellierung auszuschließen und eine möglichst hohe Genauigkeit im Vergleich zu realen Strukturen zu gewährleisten, werden im Vorfeld der Parameterstudien umfangreiche Untersuchungen an einzelnen Komponenten durchgeführt. Dabei werden einerseits Konvergenz- und Fallstudien zum FE-Modell durchgeführt, aber auch unbekannte Materialparameter aus experimentellen Messdaten ermittelt. Das akustische Auswertemodell zur Bestimmung der abgestrahlten Schalleistung wird mithilfe eines Laborversuches validiert.

## 8.1 Validierung des Modells zur Abstrahlung

In Kapitel 7.4.1 wird ein numerisches Verfahren zur Ermittlung der abgestrahlten Schalleistung von plattenförmigen Strukturen aus der Oberflächenschnelle vorgestellt. Dort wird gezeigt, dass dieses Modell auf Simulationsdaten anwendbar ist und unter Berücksichtigung der korrekten Einstellungen zur Reduzierung numerischer Fehler sehr gute Ergebnisse liefert. In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass dieses Modell in gleicher Weise auf Messdaten anwendbar ist. Gleichzeitig erfolgt dadurch eine Validierung des Verfahrens.

### 8.1.1 Messaufbau

Für die Messdaten wird auf eine Messung zurückgegriffen, die im Rahmen einer Dissertation am Lehrstuhl für Baumechanik im Labor der Firma Müller-BBM erfolgt ist [3] [50]. Der Messaufbau bietet sehr gute Voraussetzungen für eine Validierung. In diesem Laborversuch wird eine



**Abbildung 8.1:** Dodekaeder Lautsprecher [3],  
 Quelle: Müller-BBM



**Abbildung 8.2:** Messroboter [3] [50]

2 mm starke Aluminiumplatte in eine 1.50 m × 1.30 m große Aussparung einer schallharten Laborwand eingesetzt und an den Rändern luftdicht verschlossen. Diese Wand trennt das Messlabor in zwei Räume, einen Sende- und einen Empfangsraum. Die dem Aluminiumfenster gegenüberliegende Wand im Empfangsraum ist mit schallabsorbierenden Materialien verkleidet (s. Abb. 8.1), wodurch annähernde Freifeldbedingungen erreicht werden. Die Aluminiumplatte wird vom Senderraum über einen Dodekaeder-Lautsprecher angeregt (s. Abb. 8.1). Als Anreignal wird „Rosa Rauschen“ verwendet, um ein über alle Frequenzen subjektiv gleich lautes Signal zu erzeugen.

Zur Ermittlung der abgestrahlten Schalleistung der Platte wird deren Schwingantwort im Empfangsraum mithilfe eines Messroboters gemessen (s. Abb. 8.2). Dieser fährt nacheinander ein gleichmäßiges Messraster von 25 × 21 Messpunkten im Abstand von je 0.059 m ab. In jedem Messpunkt wird dabei im Abstand von 0.1 m orthogonal zur Platte parallel sowohl die Schnelle auf der Oberfläche über ein Laser-Doppler Vibrometer als auch die dortige Intensität mithilfe einer pp-Intensitätsmesssonde gemessen. Abbildung 8.3 zeigt die Anordnung der Messgeräte

am Roboterarm, im Abbildung 8.4 ist der Messaufbau skizziert.



**Abbildung 8.3:** Fenster mit Intensitätsmesssonde und Laserdopplervibrometer [3] [50], Quelle: Müller-BBM

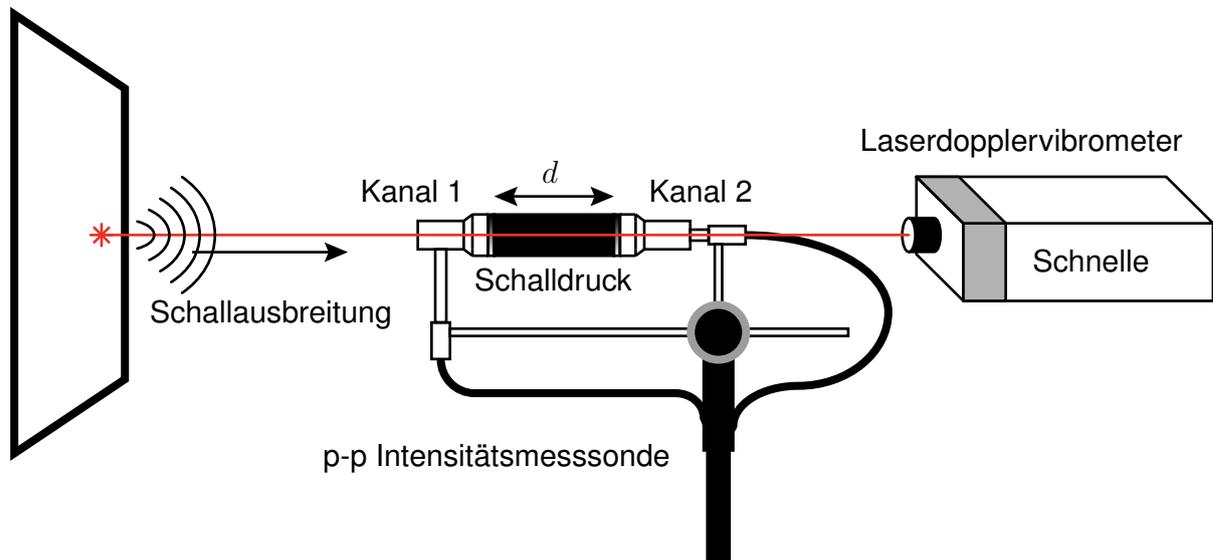


Abbildung 8.4: Skizze des Messaufbaus [3] [50], Quelle: Müller-BBM

### 8.1.2 Vergleich der Messergebnisse

Die mithilfe des Laserdopplervibrometers gemessenen Schnellesignale können direkt mithilfe des in Kapitel 7.4.1 Modells ausgewertet werden. Zum Vergleich wird parallel dazu die abgestrahlte Schalleistung aus den im Zuge der Intensitätsmessung gemessenen Schalldrücken der beiden Messmikrofone  $p_1(f)$  und  $p_2(f)$  nach Gleichung 8.1 ermittelt.

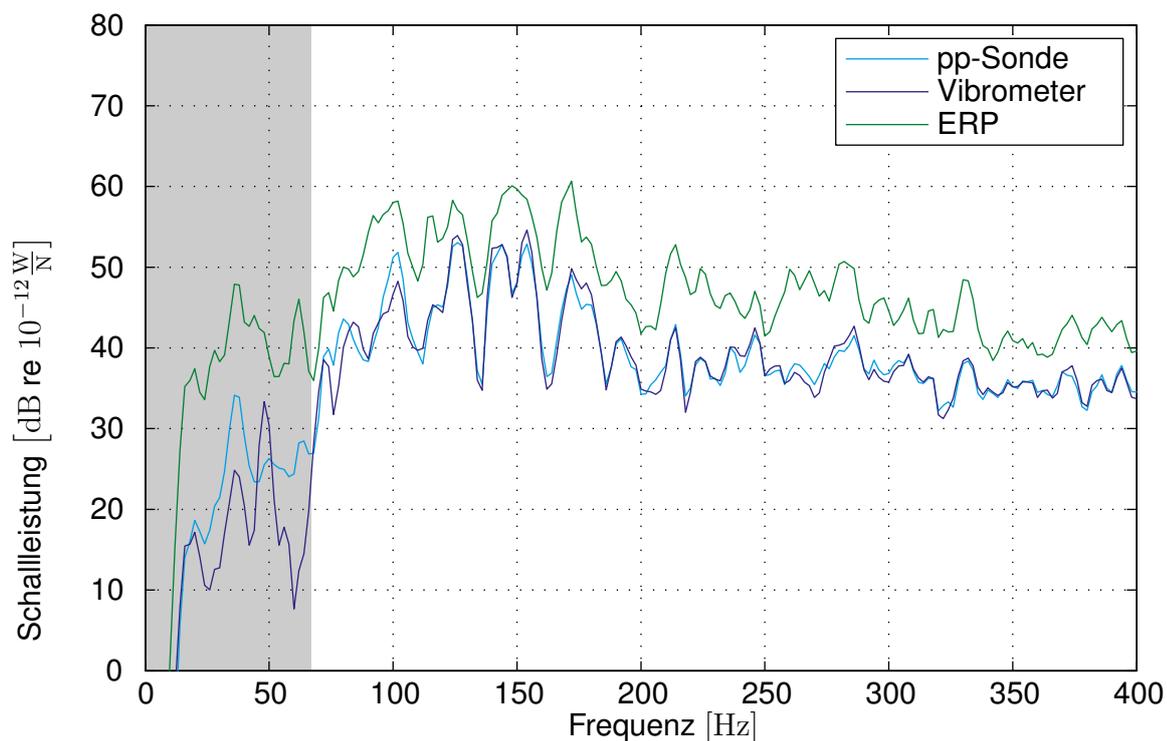
$$p_\gamma = -\frac{\Delta x \Delta y}{4\pi f_\gamma \rho d} \cdot \Im \left[ \sum_{\alpha=1}^{n_x} \sum_{\beta=1}^{n_y} p_{1,\alpha\beta\gamma} \cdot p_{2,\alpha\beta\gamma}^* \right] \quad (8.1)$$

Die einzelnen Parameter bedeuten:

|  |   |
|--|---|
| $\Delta x = 0.059 \text{ m}, \Delta y = 0.059 \text{ m}$ | Abstände der Messpunkte                               |
| $d = 0.05 \text{ m}$                                     | Länge des Abstandshalters                             |
| $\rho = 1.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$               | Dichte der Luft                                       |
| $n_x = 25, n_y = 21$                                     | Anzahl der Messpunkte                                 |
| $f_\gamma$   | Frequenz zum Frequenzschritt $\gamma$                 |
| $p_{1,\alpha\beta\gamma}, p_{2,\alpha\beta\gamma}^*$     | Schalldruck am Messpunkt zum Frequenzschritt $\gamma$ |

Die Frequenzschrittweite beträgt  $\Delta f = 2.0 \text{ Hz}$  bei einer Abtastrate von 24600 Hz.

Abbildung 8.5 zeigt die Gegenüberstellung beider Auswerteverfahren. Zusätzlich zu den aus der Schnelle (Vibrometer) bzw. aus der Intensität (pp-Sonde) ermittelten Schalleistungen wird dort die effektive abgestrahlte Schalleistung einer Kolbenmembran (ERP) nach Gleichung 7.2 im Frequenzbereich 0 – 400 Hz dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung oberhalb einer Frequenz von ca. 65 Hz. Im tieferen Frequenzbereich (grau hinterlegt) liefern die Messungen aufgrund des Messaufbaus keine verlässlichen Ergebnisse. Einerseits liefert der Lautsprecher in diesem Frequenzbereich nur eine geringe Schalleistung (unter 16 Hz erfolgt keine Anregung). Andererseits kann in diesem Frequenzbereich aufgrund der geringen Stärke der Wandabsorber nicht uneingeschränkt von Freifeldbedingungen ausgegangen werden. Darüber hinaus nimmt die Genauigkeit der Intensitätsmesssonde in diesem Frequenzbereich ab [5]. Dies gilt jedoch nicht für die Messung der Schnelle. Diese liefern im gesamten Frequenzbereich Daten gleichbleibender Güte. Die abgestrahlten Schalleistungen sind in diesem Frequenzbereich demnach nicht vergleichbar, wobei die Schalleistung aus der Oberflächenschnelle nach dem hier vorgestellten Auswertemodell tendenziell verlässlichere Ergebnisse liefert.



**Abbildung 8.5:** Vergleich der Schalleistungen aus Intensität und Schnelle. Zusätzlich aufgetragen ist die effektive abgestrahlte Schalleistung einer Kolbenmembran (ERP)

### 8.1.3 Auswertung im Wellenzahlbereich

Eine weitere Möglichkeit zur Auswertung der Messdaten bietet die Betrachtung der Schnelleverteilung auf der Platte im Wellenzahlbereich. In Abbildung 8.6 ist diese für den Frequenzschritt  $\gamma = 267$  bei 534 Hz dargestellt. Deutlich erkennbar zeichnen sich zwei Bereiche mit großen Amplituden ab. Die Wellenzahlkombinationen der Amplituden des äußeren Bereichs beschreiben eine Kreisbahn, deren Zentrum im Koordinatenursprung liegt (äußerer weißer Ring). Der Radius dieses Kreises entspricht der Biegewellenzahl der isotropen Aluminiumplatte bei dieser Frequenz.

$$k_B = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

Diese lässt sich mit

|  |                      |
|--|----------------------|
| $d = 0.002 \text{ m}$                                    | Dicke der Platte     |
| $E_{Alu} = 70000 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ | E-Modul Aluminium    |
| $\rho_{Alu} = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$         | Dichte Aluminium     |
| $\Delta f = 2.0 \text{ Hz}$                              | Frequenzschrittweite |

berechnen zu

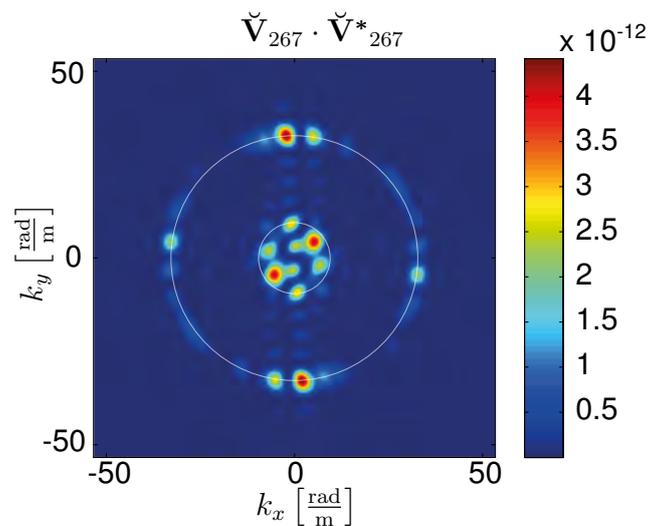
$$k_{B,\gamma} = \sqrt{\sqrt{\frac{\rho_{Alu} \cdot d}{E_{Alu} \cdot \frac{d^3}{12}}} \cdot \sqrt{2\pi \cdot \Delta f \cdot \gamma}} = 33.8 \cdot \sqrt{\gamma} \frac{\text{rad}}{\text{m}} \quad (8.2)$$

Der zweite Bereich bildet einen Kreis in dem große Amplituden auftreten (innerer weißer Ring). Dabei handelt es sich um die durch den vom Lautsprecher erzeugten Luftschall angeregten Wellenzahlen der Platte. Die Wellenzahl der Luft bei dieser Frequenz beträgt

$$k_{A,\gamma} = \frac{2\pi \cdot \Delta f \cdot \gamma}{c_A} = 9.8 \cdot \gamma \frac{\text{rad}}{\text{m}}. \quad (8.3)$$

Da auch nicht senkrechter Schalleinfall vorliegt, werden auch Schwingmuster mit längeren Wellenlängen angeregt. Im Wellenzahlbereich erkennt man dies daran, dass nicht nur die Wellenzahlkombinationen mit Radius  $k_A$ , sondern alle Wellenzahlen innerhalb des durch  $k_A$  beschriebenen Kreises angeregt werden.

In dieser Darstellung lässt sich ebenfalls sehr anschaulich das Phänomen der Koinzidenzfrequenz nachvollziehen. Während die Biegewellenzahl der Platte  $k_B$  nach Gleichung 8.2 mit



**Abbildung 8.6:** Exemplarische Darstellung eines Amplitudenspektrums im Wellenzahlbereich

der Frequenz unter der Wurzel zunimmt, vergrößert sich die Wellenzahl der Luft  $k_A$  linear (s. Glg. 8.3). Die BiegeWellenzahlen bzw. die Kombinationen gleichen Radius liegen dementsprechend ab der Koinzidenzgrenzfrequenz innerhalb des Kreises mit Radius  $k_A$  innerhalb dessen alle Wellenzahlkombinationen durch den Luftschall angeregt werden.

## 8.2 Kalibrierung der Modelle der Haupttragsysteme

In Kapitel 7.2 werden die Strukturmodelle für die numerischen Untersuchungen vorgestellt. Dabei werden Annahmen bezüglich der Modellierung einzelner Systemkomponenten getroffen. In diesem Abschnitt werden die dazu führenden Untersuchungen vorgestellt.

### 8.2.1 Konvergenzstudie zur Diskretisierung

Ein wichtiger Parameter bei der Erstellung numerischer Modelle ist die Wahl der Netzfeinheit, bzw. der Kantenlänge der Elemente  $e_{\text{size}}$ . Dieser Parameter hat entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit, aber auch auf die Rechendauer. Da die verschiedenen Module der Strukturmodelle parametrisch aufeinander aufbauen, wird die Kantenlänge der Elemente als für alle Module geltender globaler Parameter implementiert. Zur Bestimmung eines geeigneten Wertes

für  $e_{\text{size}}$  wird eine Konvergenzstudie am komplexesten Haupttragsystem, der Brettsperrholzdecke durchgeführt [23]. Neben der Kantenlänge ist hier die Anzahl der Elemente je Lage der Brettsperrholzdecke von Interesse. Als Zielfunktion wird die Konvergenz der Eigenwerte des Systems verwendet.

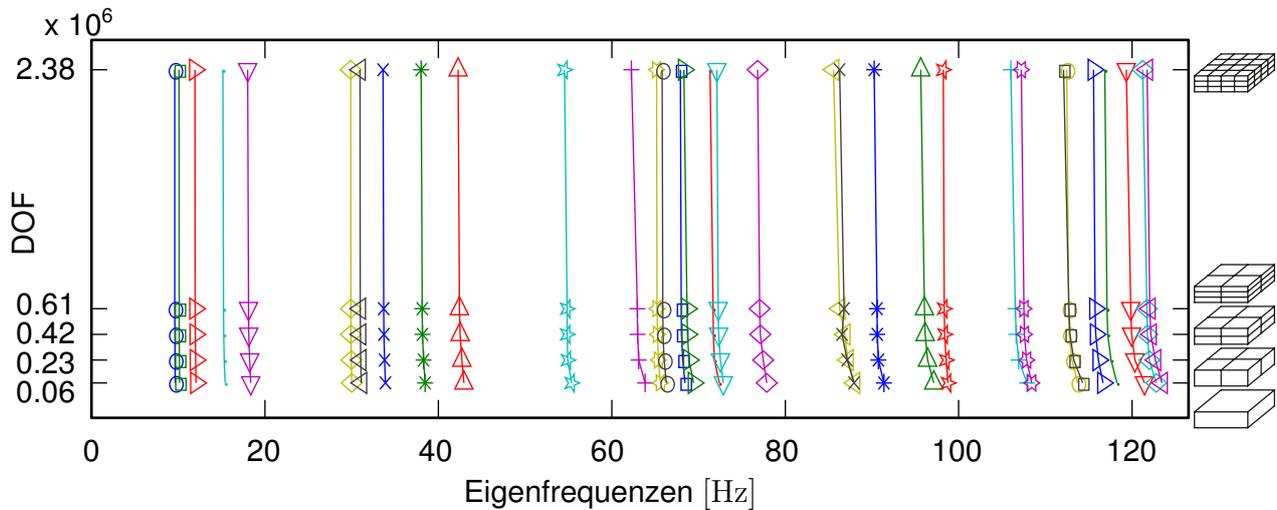
Abbildung 8.7 zeigt die Ergebnisse der Konvergenzstudie im Frequenzbereich bis 125 Hz. Rechts neben dem Diagramm ist der jeweilige Grad der Diskretisierung bezogen auf die Ausgangssituation skizziert. Es werden folgende Konfigurationen unter Beachtung der Einhaltung des Seitenverhältnisses ( $> 1 : 10$ ) für die dünnste mögliche Lage (17 mm) betrachtet.

- Kantenlänge: 0.1 m, Elemente je Brettlage:1
- Kantenlänge: 0.05 m, Elemente je Brettlage:1
- Kantenlänge: 0.05 m, Elemente je Brettlage:2
- Kantenlänge: 0.05 m, Elemente je Brettlage:3
- Kantenlänge: 0.25 m, Elemente je Brettlage:3

Deutlich erkennt man, dass obwohl die Anzahl der benötigten Freiheitsgrade (engl. „Degrees-of-Freedom“ (DOF)) exponentiell zunimmt, keine deutliche Veränderung der sich ergebenden Eigenwerte erfolgt. Die Modelle weisen dementsprechend bereits in der Ausgangssituation eine sehr gute Konvergenz auf. Da die mittlere Abweichung über alle Moden von der größten zur feinsten Diskretisierung 1.2% beträgt, wird auf Grund der deutlich geringeren Rechendauer eine Kantenlänge von  $e_{\text{size}} = 0.1$  m für alle Modelle angesetzt. Die Brettsperrholzdecke kann darüber hinaus mit einem Element je Brettlage modelliert werden.

## 8.2.2 Kalibrierung der Brettsperrholzdecke durch „Model-Updating“

Sowohl die Annahme der einzelnen Brettlagen der Brettsperrholzdecke als homogenes Volumen unter Vernachlässigung der einzelnen Bretter und ihrer Verbindungen als auch die starre Verbindung der Brettlagen untereinander kann nicht mehr durch Materialparameter aus der Literatur abgebildet werden. Um dennoch adäquate Modelle zu erzeugen werden idealisierte Materialparameter verwendet. Dazu werden die numerischen Modelle anhand von Messdaten optimiert



**Abbildung 8.7:** Konvergenzstudie zur Elementgröße

[23]. Als Zielfunktion  $f(\mathbf{x})$  wird der quadratische Mittelwert aller Abweichungen der simulierten zu den gemessenen Eigenfrequenzen angesetzt.

$$f(\mathbf{x}) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left( \frac{f_{a,i}(\mathbf{x}) - f_{m,i}}{f_{m,i}} \right)^2}, \quad k = \text{Anzahl der gemessenen Moden} \quad (8.4)$$

Wobei  $\mathbf{x}$  den Vektor der Optimierungsvariablen beschreibt. Die berechneten Eigenfrequenzen  $f_{a,i}$  sind dabei im Gegensatz zu den gemessenen Eigenfrequenzen  $f_{m,i}$  anhängig von  $\mathbf{x}$ . Die Optimierung geschieht in zwei Schritten. Zunächst wird mithilfe einer Rastersuche, einem Verfahren nullter Ordnung, ein globales Minimum der Zielfunktion ermittelt. Dies so ermittelten Parameter dienen sodann als Ausgangsparameter für einen Optimierungsalgorithmus nach der Methode des steilsten Abstiegs (erster Ordnung).

### 8.2.2.1 Rastersuche

In diesem ersten Schritt wird zunächst das in Tabelle 8.1 aufgelistete Parameterraster anhand von Steifigkeitswerten aus der Literatur [22] [32] gewählt. Der Parameter  $\nu_{\perp\perp,\text{spr}}$  hat einen zu vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis und wird daher zu 0.3 gesetzt. Zusätzlich zu den Materialparametern des Holzes wird als weiterer Optimierungsparameter das E-Modul des Elastomerauflagers aufgeführt, der gleichfalls für die übrigen Modelle verwendet werden soll. Das

Raster hierfür wird anhand der Herstellerangaben der Firma Getzner Werkstoffe GmbH angesetzt [19].

**Tabelle 8.1:** Raster für die Steifigkeitswerte der Brettsperrholdecke

|   | unterster Wert    | Inkrement        | oberster Wert      | Einheit                                    |
|---|-------------------|------------------|--------------------|--|
| $E_{\parallel,\text{spr}} = E_{x,\text{spr}}$                                 | $9700 \cdot 10^6$ | $300 \cdot 10^6$ | $11200 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ |
| $E_{\perp,\text{spr}} = E_{y,\text{spr}} = E_{z,\text{spr}}$                  | $400 \cdot 10^6$  | $100 \cdot 10^6$ | $800 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ |
| $G_{\parallel\perp,\text{spr}} = G_{xy,\text{spr}} = G_{xz,\text{spr}}$       | $400 \cdot 10^6$  | $50 \cdot 10^6$  | $600 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ |
| $G_{\perp\perp,\text{spr}} = G_{yz,\text{spr}}$                               | $40 \cdot 10^6$   | $10 \cdot 10^6$  | $80 \cdot 10^6$    | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ |
| $\nu_{\parallel\perp,\text{spr}} = \nu_{xy,\text{spr}} = \nu_{xz,\text{spr}}$ | 0.02              | 0.07             | 0.01               | [–]  |
| $E_{x,\text{elasto}}$   | $7 \cdot 10^6$    | $1.5 \cdot 10^6$ | $13 \cdot 10^6$    | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ |

Die sich daraus ergebenden 15000 Parameterkombinationen werden zur Begrenzung der Rechendauer zunächst nur auf ein Einzelplatte der Brettsperrholzdecke angewandt. Abbildung 8.8 zeigt die Ergebnisse der Rastersuche. Zu erkennen ist dort, dass bei Parameterkombination 14475 ein Minimum von 2.01 % erreicht wird.

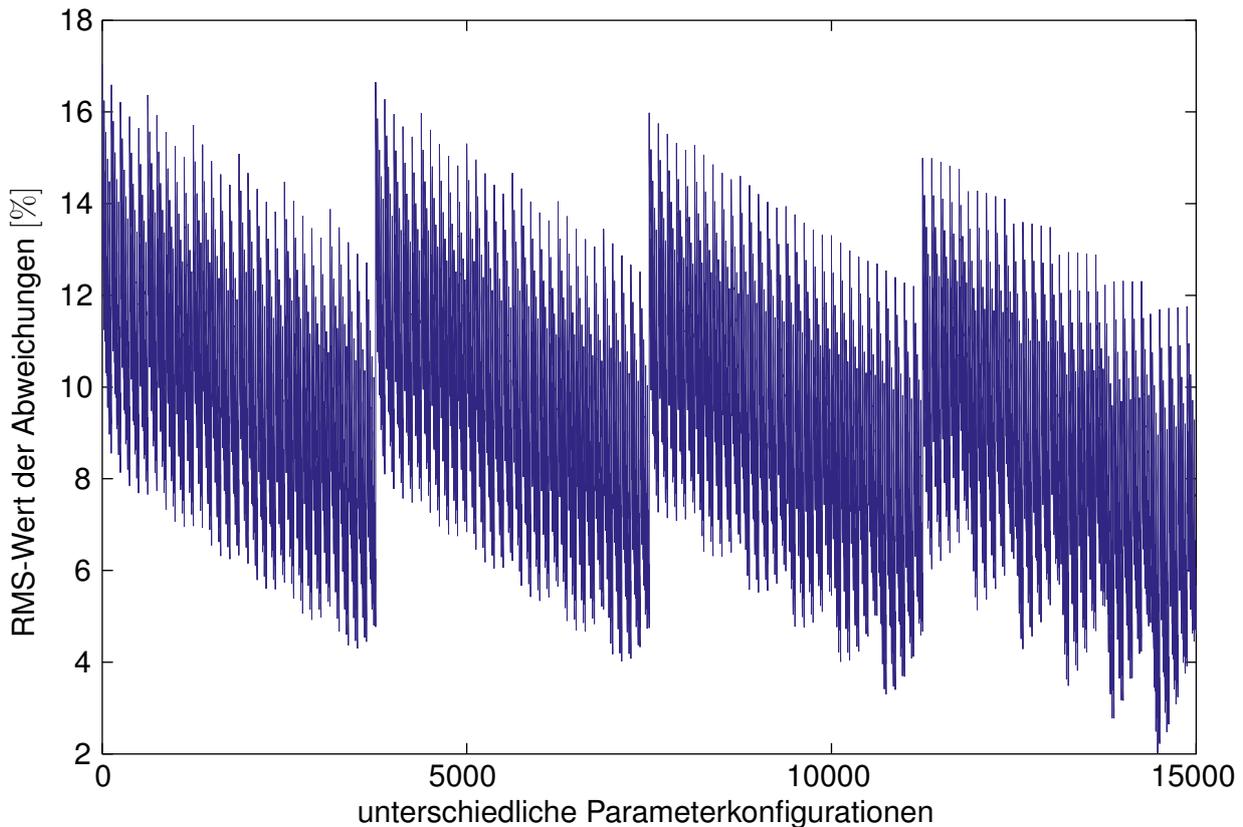
Die betreffende Parameterkombination zeigt Tabelle 8.2. Auffällig dabei ist, dass in den meisten Fällen die Randwerte des Parameterrasters gefunden werden. Bei diesen Werten kann es sich auch daher zunächst nur um die Startwerte einer weiteren Optimierung handeln.

**Tabelle 8.2:** Raster für die Steifigkeitswerte der Brettsperrholdecke

| $E_{\parallel,\text{spr}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ | $E_{\perp,\text{spr}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ | $G_{\parallel\perp,\text{spr}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ | $G_{\perp\perp,\text{spr}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ | $\nu_{\parallel\perp,\text{spr}} [-]$ | $E_{x,\text{elasto}} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$ |
|---|---|--|--|---------------------------------------|--|
| 11200   | 400   | 550  | 80   | 0.07                                  | 13   |

### 8.2.2.2 Optimierung mithilfe der Methode des steilsten Abstiegs

Die zuvor mithilfe einer Rastersuche an einer Einzelplatte ermittelten Materialparameter werden im weiteren als Startwerte für das gradientenbasierte Verfahren nach der Methode des steilsten Abstiegs verwendet. Anders als bei der vorangegangenen Auswertung wird hierbei die gesamte Decke optimiert. Dies schließt somit auch die Federsteifigkeit der Kopplung der Einzelplatten mit ein, wodurch die zu optimierenden Parameter um  $k_{y,\text{lin}}$  ergänzt werden müssen. Der Startwert für  $k_{y,\text{lin}}$  wird nach überschlägiger Berechnung aus der Steifigkeit der Kerto-Streifen zu  $10.0 \frac{\text{N}}{\text{m}}$



**Abbildung 8.8:** Ergebnisse der Rastersuche

festgelegt [23].

Ein schematischer Ablauf des Optimierungsprozesses ist in Abbildung 8.9 dargestellt. Gesteuert wird der gesamte Prozess in MATLAB<sup>®</sup>. Hier werden zunächst die Startwerte für die Materialparameter in den jeweiligen Untermodulen der Strukturmodelle eingegeben. Anschließend wird die Eingabedatei mit den Modulen für die Brettsper Holzdecke, die Elastomerauflager und die Modalanalyse im „batch“-Modus von ANSYS<sup>®</sup> eingelesen und die Berechnung gestartet. Die resultierenden Eigenwerte und Eigenvektoren werden im Anschluss aus der Ausgabedatei ausgelesen. Zur Eingabe in die Zielfunktion muss sichergestellt werden, dass die jeweils passenden Eigenfrequenzen von Simulation und Messdaten verglichen werden. Dazu werden die Eigenvektoren mithilfe des sog. „Modal Assurance Criterion“ (MAC) verglichen. Diese ist wie folgt definiert [17]:

$$\text{MAC}_{jk} = \frac{|\Phi_{rj}^T \Phi_{ak}|^2}{(\Phi_{ak}^T \Phi_{ak})(\Phi_{rj}^T \Phi_{rj})} \quad (8.5)$$

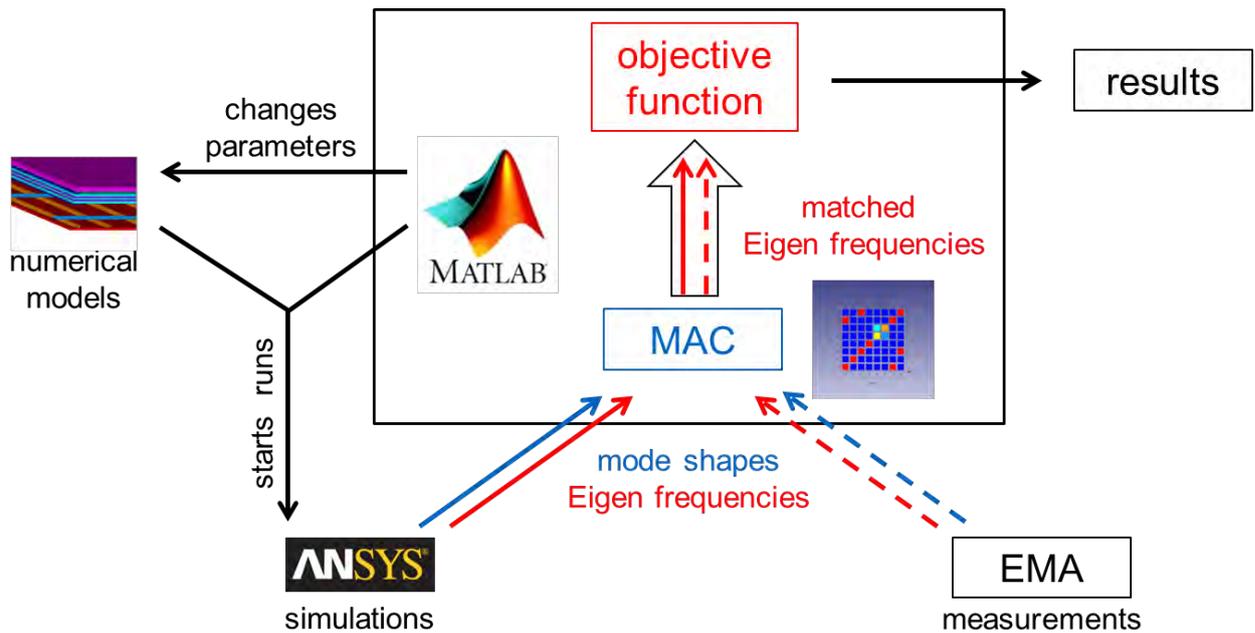


Abbildung 8.9: Schema Optimierungsprozess

Das **MAC** nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei ein Wert nahe 1 als Indiz für übereinstimmende Moden gedeutet werden kann. Damit kann der Wert der Zielfunktion berechnet werden. Anschließend werden die Parameter nach der Methode des steilsten Abstiegs neu berechnet und ein weiterer Optimierungslauf gestartet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird [23].

In Tabelle 8.3 sind die Ergebnisse der Optimierung neben den Startwerten angegeben. Gegenüber diesen lässt sich der RMS-Wert von 7.32 % auf 5.01 % verbessern. Die idealisierten Parameter liegen überwiegend im erwarteten Bereich. Einzig  $E_{\perp}$  nimmt deutlich geringere Werte an. Dies erklärt sich durch den Aufbau des Brettsperrholzes, bei dem die einzelnen Bretter orthogonal zur Faserrichtung nicht kraftschlüssig verbunden sind. Bei der Idealisierung als homogenes Volumen wird dies nicht berücksichtigt und muss folgerichtig über die Reduzierung des Materialparameters  $E_{\perp}$  ausgeglichen werden.

Somit steht für das Modell der Brettsperrholzdecke ein vollständig validierter Satz Materialparameter zur Verfügung.

**Tabelle 8.3:** Optimierungsergebnis nach Einbeziehung aller Messungen

| Parameter  | Startwert | Ergebnis |
|--|-----------|----------|
| $E_{\parallel}$ $\left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}\right]$      | 11200     | 10981    |
| $E_{\perp}$ $\left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}\right]$          | 400       | 137      |
| $G_{\parallel\perp}$ $\left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}\right]$ | 550       | 459      |
| $G_{\perp\perp}$ $\left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}\right]$     | 80        | 74.2     |
| $E_{x,Syl}$ $\left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^2}\right]$          | 13        | 11.3     |
| $k_{y,lin}$ $\left[\frac{\text{MN}}{\text{m}}\right]$            | 10        | 10.1     |
| $\nu_{\parallel\perp}$ $[-]$                                     | 0.07      | 0.052    |
| RMS-Wert mit Startkonfiguration                                  |           | 7.32 %   |
| RMS-Wert nach Optimierung  |           | 5.01 %   |

## 8.2.3 Untersuchungen zur Modellierung der Holzbalkendecke

Sowohl die Holzbalken als auch die OSB-Platten der Holzbalkendecke werden in Kapitel 7.2.3 mit orthotropen Materialien modelliert. Beide Baustoffe weisen eine starke Streuung der Materialparameter auf, weshalb diese in diesem Abschnitt anhand von Messungen an den Einzelbauteilen überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

### 8.2.3.1 Holzbalken

Zur vollständigen Beschreibung orthotroper Materialien werden neben der Dichte, wie bereits in Kapitel 6.1 erläutert, neun Materialkennwerte benötigt. Da es sich im Falle des Holzes zudem um ein transversal isotropes Material handelt, können diese theoretisch weiter auf die Kennwerte  $E_{\parallel}$ ,  $E_{\perp}$ ,  $G_{\parallel\perp}$ ,  $G_{\perp\perp}$  und  $\nu_{\parallel\perp}$  reduziert werden. Die Besonderheit im Falle des Werkstoffs Holz ist weiterhin, dass der isotrope Zusammenhang zwischen  $G_{\perp\perp}$ ,  $E_{\perp}$  und  $\nu_{\perp\perp}$  nicht gilt, weshalb zusätzlich der Kennwert  $\nu_{\perp\perp}$  angegeben werden muss. In der Literatur [32] [31] [43] werden die Materialparameter von Fichtenholz bezogen auf die Jahrringe des Holzes in Longitudinal-, Tangential und Radialrichtung (L,T,R) angegeben. Diese Angaben in Zylinderkoordinaten können nicht ohne weiteres auf die kartesischen Koordinaten in den FE Modellen angewandt werden. Es bietet sich daher an, die Materialkennwerte in der oben genannten transversal isotropen Form anzuwenden. In Grimsel [24] wird dazu eine Koordinatentransformation vorgestellt. Überschlä-

gig lassen sich zudem nach Neuhaus [43] und Gülzow [22] die folgende Annahmen treffen:

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_{\parallel} = E_L \\
 E_y &= E_z = E_{\perp} = E_T \\
 G_{xy} &= G_{xz} = G_{\parallel\perp} = G_{LT} \\
 G_{yz} &= G_{\perp\perp} = G_{RT} \\
 \frac{\nu_{xy}}{E_x} &= \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y} = \frac{\nu_{zx}}{E_z} = \frac{\nu_{\parallel\perp}}{E_{\parallel}} = \frac{\nu_{\perp\parallel}}{E_{\perp}} = \frac{\nu_{LR} + \nu_{LT}}{2E_L} \\
 \implies \nu_{xy} &= \nu_{xz} = \frac{\nu_{LR} + \nu_{LT}}{2} \\
 \frac{\nu_{yz}}{E_y} &= \frac{\nu_{zy}}{E_z} = \frac{\nu_{\perp\perp}}{E_{\perp}} = \frac{\nu_{TR}}{E_T} \\
 \implies \nu_{yz} &= \nu_{TR}
 \end{aligned}$$

Mit den in Neuhaus [43] zusammengestellten Werten für Fichtenholz bei einer Holzfeuchte von 12 % können somit die in Tabelle 7.6 aufgelisteten Materialparameter hergeleitet werden.

Zur Überprüfung dieser Parameter werden die ersten beiden Biegeeigenfrequenzen von elf Holzbalken der untersuchten Holzbalkendecke mit denen eines Einzelbalkenmodells verglichen. In Abbildung 8.10 sind die Ergebnisse der Messungen in einem Diagramm dargestellt (schwarze Rauten). Die Ergebnisse der Simulation sind durch waagerechte rote Linien angedeutet. Die Parameterkonfiguration liefert für beide Eigenfrequenzen akzeptable Ergebnisse im Bereich der Mittelwerte der Messungen.

### 8.2.3.2 OSB-Platten

Für die OSB Platten liegt durch Herstellerangaben nur ein unvollständiger Satz Materialparameter vor. So werden für das Produkt AGEPAN OSB/4 PUR in [21] folgende Dichte und Elastizitätskennzahlen genannt.

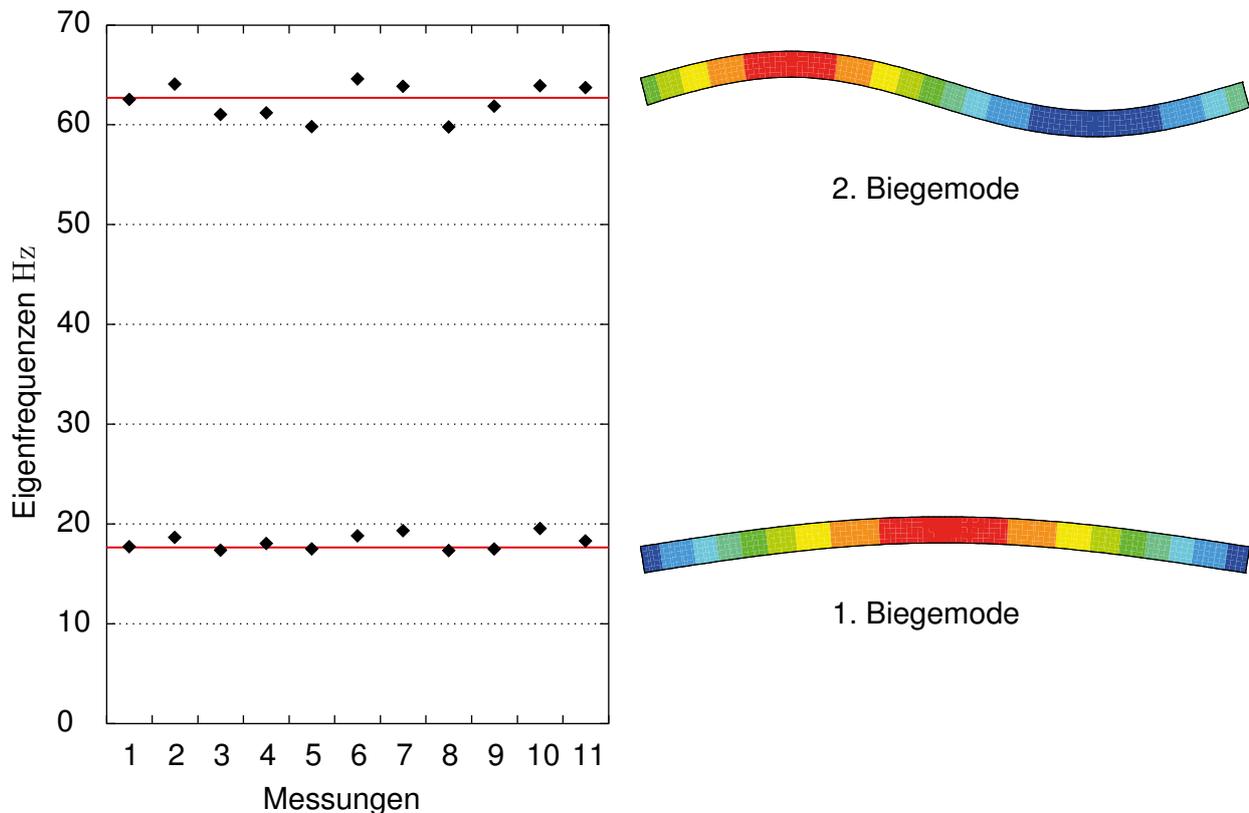


Abbildung 8.10: Vergleich der ersten beiden Eigenfrequenzen der Holzbalken

Tabelle 8.4: Materialparameter aus Datenblatt AGEPAN OSB/4 PUR

| Parameter | Wert              | Einheit                                     |
|-----------|-------------------|---|
| $\rho$    | $> 600$           | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| $E_0$     | $6780 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| $E_{90}$  | $2680 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| $G_v$     | $1090 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| $G_r$     | $60 \cdot 10^6$   | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |

Da es sich hierbei jedoch lediglich um die nach EN 12369-1 geforderten Werte [13] handelt, werden die wichtigsten Parameter  $\rho_{\text{OSB}}$ ,  $E_{x,\text{OSB}}$  und  $E_{y,\text{OSB}}$  durch Messungen überprüft und angepasst. Dazu werden acht OSB-Platten mit den Abmessungen  $1.25 \text{ m} \times 2.50 \text{ m} \times 0.018 \text{ m}$  messtechnisch untersucht. Die Platten werden dazu zunächst einzeln gewogen und die mittlere Dichte durch Mittelwertbildung ermittelt. Die Steifigkeiten in  $x$ - und  $y$ -Richtung werden mithilfe

von experimentellen Modalanalysen festgestellt. Hierbei werden die Platten jeweils in Haupt- und Nebentragsrichtung zweiseitig gelenkig liniengelagert und mittig durch einen Modalhammer angeregt. Aus dem so ermittelten Frequenzgang können in jeder Richtung die ersten Biegeeigenfrequenzen ermittelt werden. Aus diesen können wiederum die E-Moduli durch Umstellen der Gleichung für die Eigenfrequenzen von Biegebalken abgeschätzt werden.

$$f_n = \frac{\pi \cdot n^2}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_y}{\mu}} \quad (8.6)$$

Abbildung 8.11 zeigt für jede OSB-Platte die ermittelten Werte für Dichte und E-Modul.

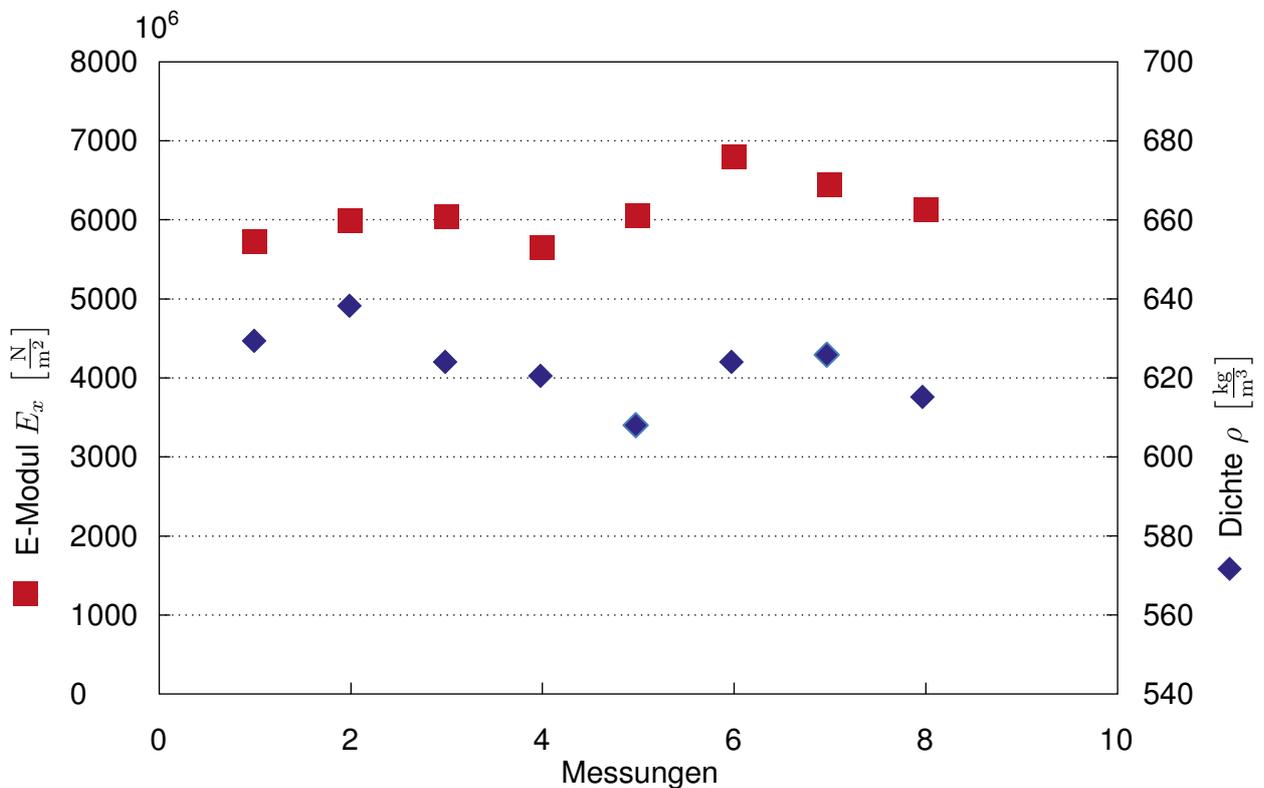


Abbildung 8.11: Dichte und E-Modul der OSB-Platten

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 8.5 zusammengefasst.

**Tabelle 8.5:** Messergebnisse der OSB Platten

| Messung    | $m$ [kg] | $\rho$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ] | $f_{1x}$ [Hz] | $E_x$ [ $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ] | $f_{1y}$ [Hz] | $E_y$ [ $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ] |
|------------|----------|---|---------------|---|---------------|---|
| 1          | 35.4     | 629.3                                     | 3.9           | $5728 \cdot 10^6$                       | 9.6           | $2108 \cdot 10^6$                       |
| 2          | 35.9     | 638.2                                     | 4.0           | $5988 \cdot 10^6$                       | 9.4           | $2058 \cdot 10^6$                       |
| 3          | 35.1     | 624.0                                     | 4.1           | $6031 \cdot 10^6$                       | 9.1           | $1877 \cdot 10^6$                       |
| 4          | 34.9     | 620.4                                     | 3.9           | $5647 \cdot 10^6$                       | 9.4           | $2026 \cdot 10^6$                       |
| 5          | 34.2     | 608.0                                     | 4.1           | $6051 \cdot 10^6$                       | 9.7           | $2092 \cdot 10^6$                       |
| 6          | 35.1     | 624.0                                     | 4.3           | $6797 \cdot 10^6$                       | 9.6           | $2116 \cdot 10^6$                       |
| 7          | 35.2     | 625.8                                     | 4.2           | $6442 \cdot 10^6$                       | 9.7           | $2153 \cdot 10^6$                       |
| 8          | 34.6     | 615.1                                     | 4.1           | $6122 \cdot 10^6$                       | 9.4           | $2009 \cdot 10^6$                       |
| Mittelwert | 35.1     | 623.1                                     | 4.1           | $6097 \cdot 10^6$                       | 9.5           | $2055 \cdot 10^6$                       |

Zu erkennen sind zum Teil große Abweichungen von den Herstellerangaben, sodass für die Berechnungen die experimentell ermittelten Werte angesetzt werden. Für die übrigen Elastizitätskennzahlen wird auf Meistring [35] verwiesen.

## 8.3 Untersuchungen zur abgehängten Decke

Wie bei den Hauptstrukturen werden auch beim Modell zur abgehängten Decke vereinfachende Annahmen für die Modellierung getroffen. So wird zum Einen die doppelte Beplankung mit kreuzweise verschraubten einzelnen Gipsfaserplatten als eine homogene Platte angenommen. Zum Anderen werden die Abhänger durch einfache Feder-Dämpfer-Elemente abgebildet. Diese Annahmen machen die Ermittlung idealisierter Materialkennwerte erforderlich.

### 8.3.1 Bestimmung der Materialparameter der Gipsfaserplatten im Wellenzahlbereich

Für die verwendeten Gipskartonplatten vom Typ GKB A mit den Abmessungen  $1.25 \text{ m} \times 2.50 \text{ m} \times 0.0125 \text{ m}$  werden vom Hersteller Knauf die in Tabelle 8.6 Angaben für Dichte und E-Modul gemacht. Durch die kreuzweise Verschraubung wird im Folgenden von einem isotropen Material-

verhalten mit mittlerem E-Modul ausgegangen. Die Quersehnzahl wird nach [59] zu  $\nu_{\text{gypsum}} = 0.2$  gewählt.

**Tabelle 8.6:** Materialparameter aus Datenblatt GKB A

| Parameter | Wert                   | Einheit                                     |
|-----------|------------------------|---|
| $\rho$    | $\geq 680$             | $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ |
| $E_0$     | $\geq 2800 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |
| $E_{90}$  | $\geq 2200 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$  |

Durch die Idealisierung als einfache Beplankung wird unter Verwendung der Herstellerangaben die Biegesteifigkeit der Platte überschätzt und muss folglich durch eine idealisierte Biegesteifigkeit ersetzt werden. Als obere Grenze kann die Biegesteifigkeit einer Platte der doppelten Dicke ( $2 \cdot d$ ), als untere Grenze die zweier ohne Schubverbindungen gekoppelter Einzelplatten angenommen werden.

$$EI_{\max} = E \cdot \frac{(2 \cdot d)^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

$$EI_{\min} = 2 \cdot E \cdot \frac{d^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

$$\frac{EI_{\max}}{EI_{\min}} = 4$$

Da in der Simulation das Flächenträgheitsmoment einer Platte mit doppelter Dicke entspricht muss die Idealisierung über die Anpassung des E-Moduls erfolgen. Analog zur Biegesteifigkeit kommt dafür ein Wert in folgenden Grenzen in Frage

$$\frac{2200}{4} \cdot 10^6 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right] \leq E_{\text{x,gypsum}} \leq 2800 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right] \quad (8.7)$$

In Abschnitt 8.1.3 wird gezeigt, dass die Biegewellenzahlen einer Platte zu jeder Frequenz aus dem gemessenen Wellenzahlspektrum herausgelesen werden kann. Diese entsprechen bei höheren Frequenzen den Biegewellenzahlen einer unendlichen Platte nach Gleichung (8.2). Der E-Modul der Gipskartonplatte lässt sich dementsprechend iterativ durch den Vergleich der jeweiligen Biegewellenzahlen über der Frequenz ermitteln.

In Abbildung 8.12 sind die gemessenen Wellenzahlen der Unterdecke unter einer Brettsperrholzdecke bei Anregung der Unterdecke über die Frequenz aufgetragen. Dieser überlagert ist die

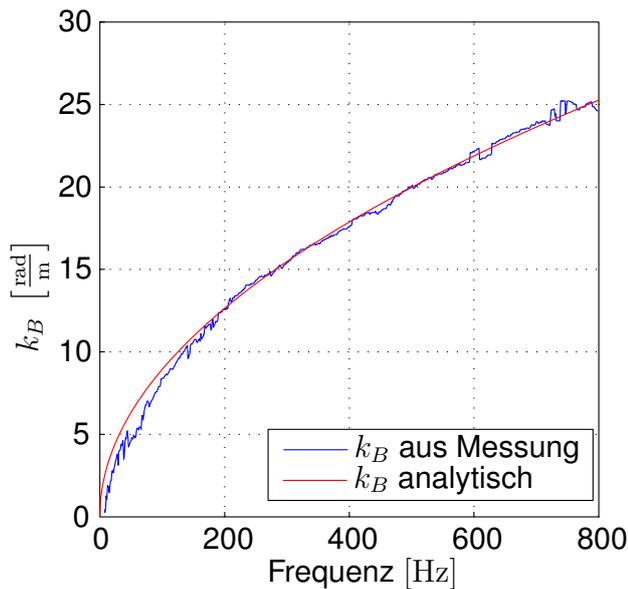


Abbildung 8.12: Wellenzahlen der Unterdecke

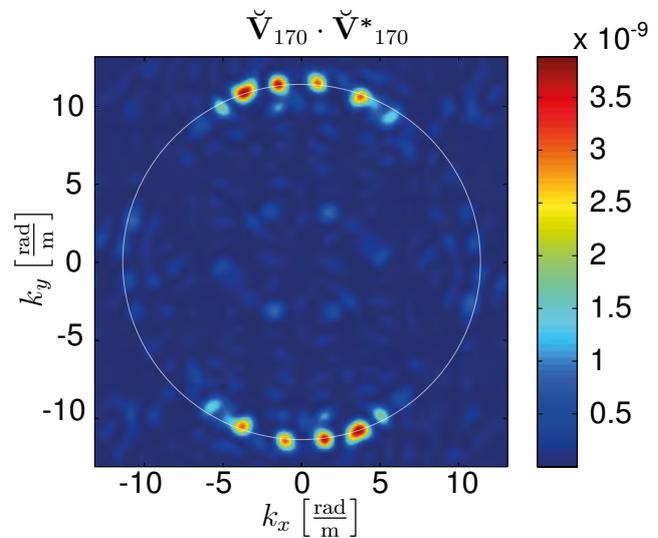


Abbildung 8.13: Unterdecke unter HBD

Kurve der Biege-Wellenzahlen einer unendlichen Platte mit einem iterativ bestimmten E-Modul von  $E_{x,\text{gypsum}} = 1020 \cdot 10^6 \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$ . Die Kurven zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Der E-Modul befindet sich innerhalb der in Gleichung 8.7 hergeleiteten Grenzen. Für die Dichte wird der von Tröbs [54] gemessene Wert  $\rho_{\text{gypsum}} = 856 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$  angenommen. Ein Vergleich mit dem Wellenzahlspektrum der Unterdecke unter der Holzbalkendecke bei 170 Hz (s. Abb. 8.13) zeigt, dass diese Ergebnisse in gleicher Weise auf andere Deckensysteme anwendbar sind. Die Biege-Wellenzahl der unendlichen Platte hat bei  $f = 170 \text{ Hz}$  den Wert von  $k_B = 11,5 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$ .

### 8.3.2 Messtechnische Untersuchung unterschiedlicher Abhänger

Die Deckenabhänger werden durch Feder-Dämpfer-Elemente idealisiert. Die Feder- und Dämpferkonstanten werden nach Maznikova [34] verwendet. In dieser Arbeit werden für verschiedenen Deckenabhängersysteme Modalanalysen mit unterschiedlichen angehängten Gewichten durchgeführt. Anhand der daraus ermittelten Eigenfrequenzen und Lehr'schen Dämpfungsmaße kann auf die Feder- und Dämpferkonstanten geschlossen werden.

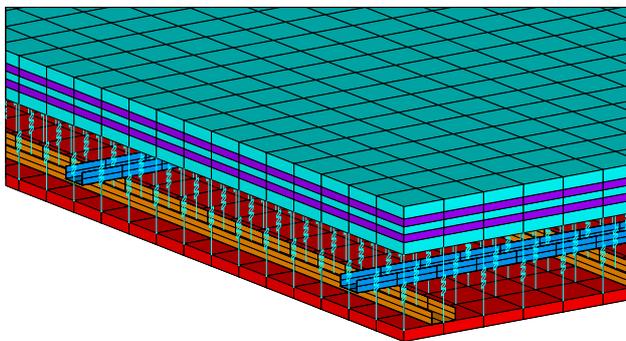
Für die hier verwendeten Direktschwingabhänger lassen sich dort die in Tabelle 8.7 genannten Werte herleiten.

**Tabelle 8.7:** Feder- und Dämpfungskonstante Direktschwingabhänger

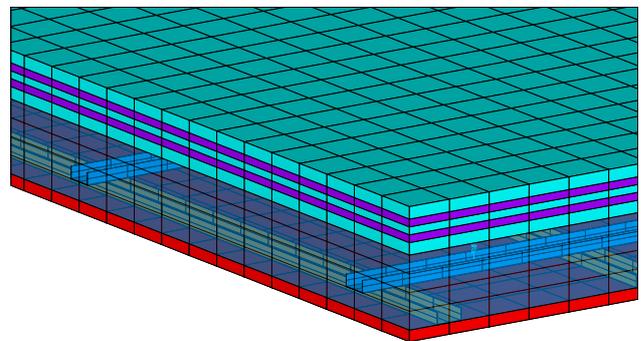
| Parameter        | Wert               | Einheit                                   |
|------------------|--------------------|---|
| $k_{\text{DSA}}$ | $0.165 \cdot 10^6$ | $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}}\right]$  |
| $c_{\text{DSA}}$ | 78                 | $\left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}}\right]$ |

## 8.4 Aspekte der Modellierung der Luft im Zwischenraum

Bei der Modellierung der Luft im Zwischenraum zwischen Rohdecke und abgehängter Decke werden unterschiedliche Ansätze verfolgt, die sich im Grad der Idealisierung und der Rechen-dauer unterscheiden. Ein erster Ansatz besteht darin, die Luft als vertikale Ersatzfedern abzu-bilden (s. Abb. 8.14), wobei die Luft idealisiert als einzelne Luftsäulen ohne Interaktion in hori-zontaler Richtung angenommen wird. Als weitere Option kann die Luft in Gänze als Volumen mit akustischen Fluidelementen modelliert werden (s. Abb. 8.15). Letzterer Ansatz ist mit erheblich mehr Rechenaufwand verbunden, da vor allem aufgrund der dadurch erzeugten unsymmetri-schen Matrizen aufwändigere Lösungsmethoden angewendet werden müssen (s. Kapitel 7.3), aber auch die Anzahl der benötigten Freiheitsgrade hierbei gegenüber der Modellierung mit Ersatzfedern deutlich erhöht ist.



**Abbildung 8.14:** Luft, modelliert durch Ersatzfe-dern



**Abbildung 8.15:** Luft, modelliert mit Fluidele-menten

## 8.4.1 Validierung der Referenzmessung

Zur Evaluierung der unterschiedlichen Ansätze erfolgt zunächst eine Validierung der Messergebnisse. Wie in Kapitel 3.2.5 erläutert werden dazu zunächst analog zu Abschnitt 8.1 die Ergebnisse der abgestrahlten Schalleistung ermittelt aus Intensitätsmessungen (mithilfe einer pp-Sonde) mit einer Auswertung der Oberflächenschnelle nach dem in Kapitel 7.4.1 vorgestellten Verfahren verglichen. Im Gegensatz zu Abschnitt 8.1 werden hier jedoch Beschleunigungsaufnehmer (B-Aufnehmer) verwendet und die Messdaten in Körperschallschnellen umgerechnet. Die Anregung erfolgt mithilfe eines elektrodynamischen Schwingerregers. In Abbildung 8.16 sind die Verläufe der jeweiligen Schalleistung normiert auf die über den Shaker eingebrachte Kraft gegeneinander dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung ab einem Frequenzbereich von ca. 30 Hz. Die großen Abweichungen im niedrigeren Frequenzbereich (grau hinterlegt) resultieren aus der Art der Anregung. Es wird ein Gleitsinus verwendet, der in diesem Bereich nur geringe Kräfte einleitet. Im Folgenden werden zum Vergleich der Simulation mit der Messung die Resultate aus den Daten der Beschleunigungsaufnehmer verwendet.

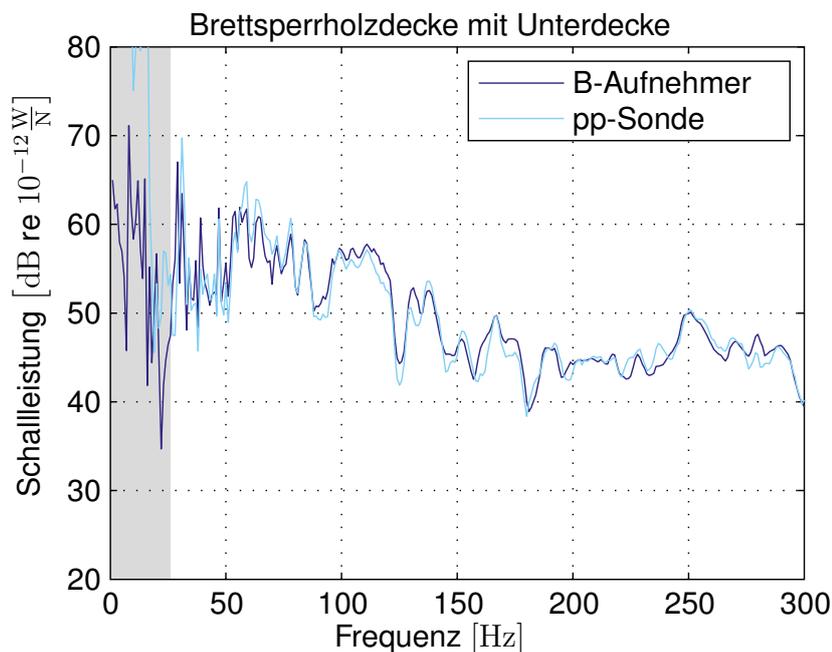


Abbildung 8.16: Vergleich der Schalleistung aus Intensität und Schnelle

## 8.4.2 Fallstudie zur Modellierung

Für den Vergleich der unterschiedlichen Modellierungsansätze werden zunächst Ersatzmodelle definiert. Da die Idealisierung der Luft als Ersatzfeder die Masse der Luft vernachlässigt, wird parallel dazu ein leicht abgewandeltes Modell erstellt, bei dem die einzelnen Luftsäulen als massebelegte Dehnstäbe modelliert werden. Feder- und Dehnstab-Elemente werden zwischen allen sich vertikal gegenüberliegenden Konten der untersten Ebene der jeweiligen Rohdecke und der Schalenelemente der Unterdecke definiert. Der Abstand beträgt  $h_{\text{air}} = l_{\text{hang}} + w_{1,\text{profil}}$ . Die jeweilige Einzugsfläche einer Luftsäule entspricht der Fläche eines Schalenelements und brechnet sich somit zu  $A_{\text{col,air}} = e_{\text{size,x}} \cdot e_{\text{size,y}}$ .

Mit den Materialparametern der Luft  $\rho_{\text{air}}$  und  $c_{\text{air}}$  können die äquivalenten Feder- und Dehnsteifigkeiten berechnet werden. Diese lauten somit

$$EA_{\text{subst,A}} = \rho_A \cdot c_A^2 \cdot A_{\text{col,A}}$$

$$k_{\text{subst,A}} = \frac{EA_{\text{subst,A}}}{h_A}$$

Beim Modell mit Fluidelementen wird zunächst nur die Fluid-Struktur-Interaktion berücksichtigt und eine eventuell vorhandene Dämpfung an den Rändern aufgrund von Bewegungen in horizontaler Richtung vernachlässigt.

Die Auswertung der Schalleistung aus den Simulationsergebnissen aller Modelle unter einer Brettsperrholzdecke bei Anregung der Rohdecke ist in Abbildung 8.17 dargestellt. Man erkennt, dass die Ersatzmodelle sowohl bei Verwendung von Federn als auch bei Dehnstäben wenig Übereinstimmung mit den Messdaten zeigen. Während im Frequenzbereich bis ca. 80 Hz die Messung teilweise überschätzt wird, liegend die simulierten Daten im höheren Frequenzbereich bis zu 20 dB darunter. Im Gegensatz dazu liegt die mithilfe von Fluidelementen simulierte Schalleistung überwiegend im Bereich der gemessenen Schalleistung. Auffällig sind hierbei mehrere ausgeprägte Resonanzspitzen. Da diese bei den Ersatzsystemen fehlen, liegt die Vermutung nahe, dass gerade diese Eigenformen für die Schalleistung wichtig sind. Im nächsten Abschnitt wird daher das Schwingmuster im Bereich der Resonanzspitze bei 135 Hz untersucht.

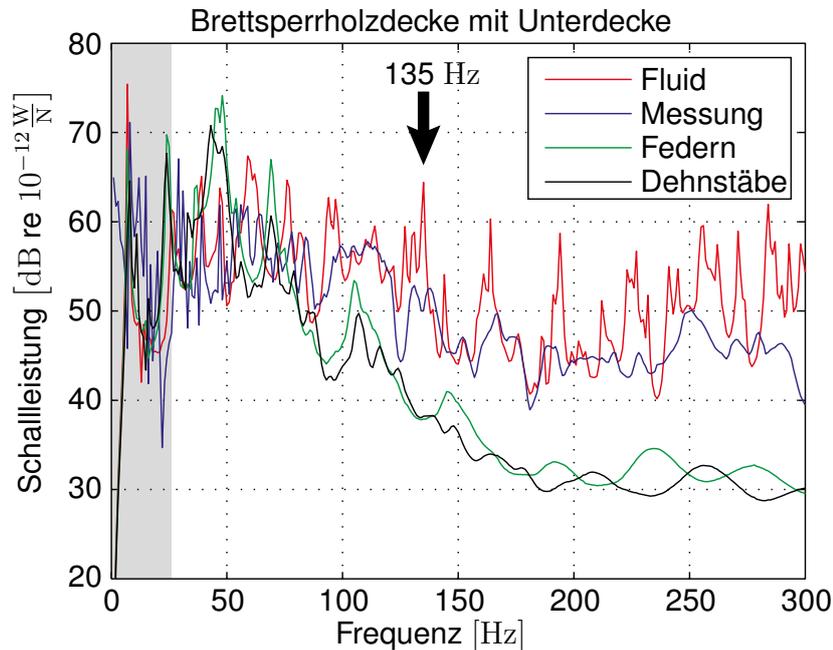


Abbildung 8.17: Vergleich der Messdaten mit unterschiedlichen Modellierungsarten

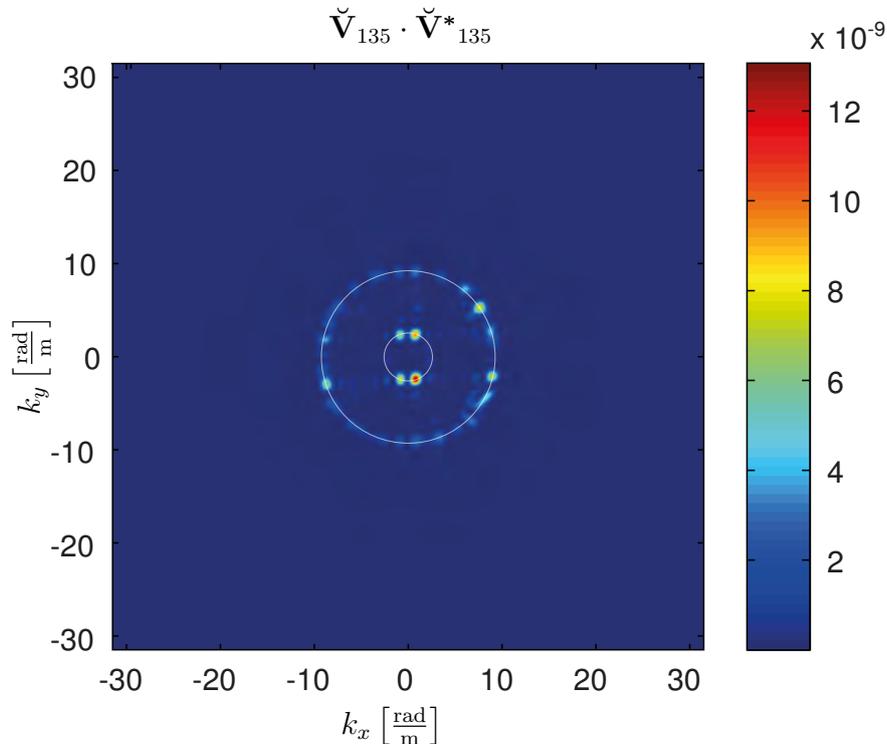
### 8.4.3 Untersuchung im Wellenzahlbereich

Eine Modellierung mithilfe von Fluidelementen stellt nach der oben gezeigten Fallstudie den Ansatz der besten Übereinstimmung mit den Messdaten dar. In diesem Abschnitt wird dieser Ansatz daher tiefergehend untersucht. Bereits in den vorangegangenen Kapiteln hat sich eine Untersuchung im Wellenzahlbereich als besonders aussagekräftig erwiesen, weshalb diese Betrachtungsweise auch hier angewandt wird. Abbildung 8.18 zeigt die Schnelleverteilung auf der Beplankung der Unterdecke für den Frequenzschritt  $\gamma = 135$  bei 135 Hz im Wellenzahlbereich. Der Vergleich mit den Messdaten bei direkter Anregung der Unterdecke in Abbildung 8.12 zeigt, dass innerhalb der hohen Amplituden im Bereich der Biegewellenzahlen der Platte, die den äußeren Kreis bilden, weitere große Amplituden auftreten, die wiederum auf einem Kreis liegen, dessen Radius der Wellenzahl der Luft entspricht.

$$k_A(135 \text{ Hz}) = 2\pi \cdot \frac{135 \text{ Hz}}{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2.49 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$$

Diese langwelligeren Anteile sind im Schnellefeld der Beplankung im Ortsbereich (s. Abb. 8.19 links) nicht zu erkennen. Sie werden von den kurzwelligeren Anteilen der Platte maskiert. Der Wechseldruck in einem Schnitt durch das Luftvolumen im Inneren der Decke (s. Abb. 8.19

rechts) zeigt, dass es sich bei der Resonanzspitze bei 135 Hz um eine Hohlraumresonanz des Luftvolumens handelt.



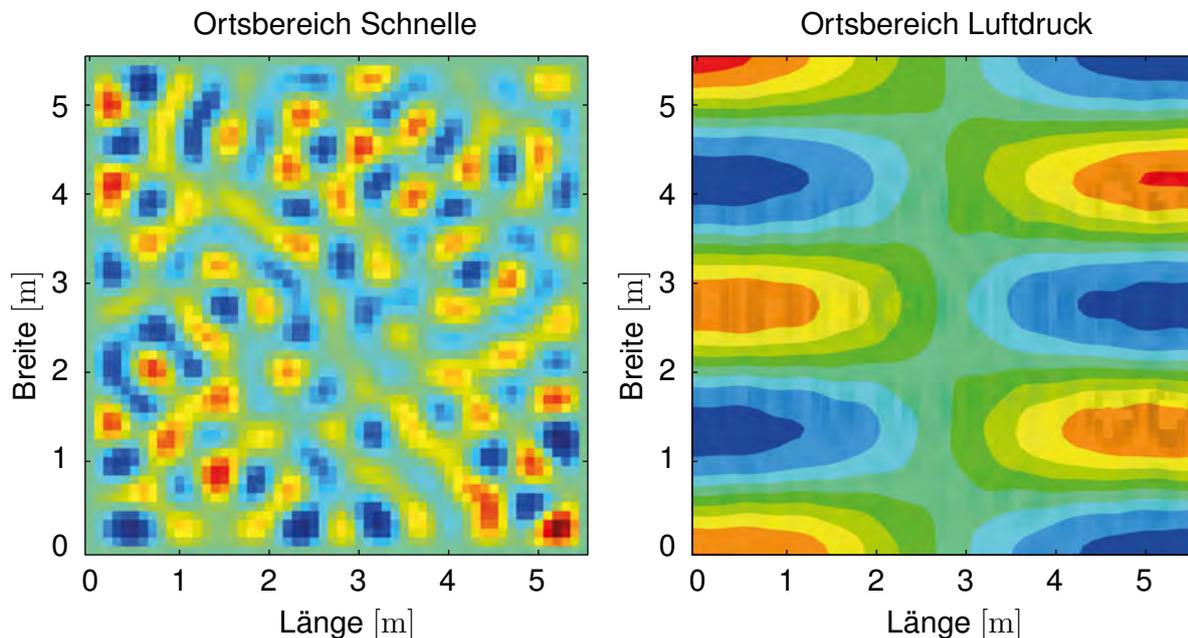
**Abbildung 8.18:** Wellenzahlbereich an der Resonanz bei 135 Hz

Damit erklärt sich auch der Mechanismus der Schallübertragung innerhalb der Konstruktion. Die angeregte Rohdecke (in diesem Fall Brettsperholzdecke) regt ihrerseits das Luftvolumen an, wobei nach Gleichung 7.1 die Schallleistung vor allem im Bereich der Wellenzahl der Luft übertragen wird. Somit werden im Luftvolumen die Hohlraumresonanzen in besonderem Maße angeregt. Diese lassen sich näherungsweise mit der von Lord Rayleigh beschriebenen Formel

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c_A}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (8.8)$$

berechnen, wobei  $l_x$ ,  $l_y$  und  $l_z$  die Abmessungen des Raumvolumens darstellen. Die Mode in Abbildung 8.19 (rechts) hat die Indizes  $n_x = 1$ ,  $n_y = 4$ ,  $n_z = 0$ , ihr Äquivalent nach Gleichung 8.8 ist somit bei  $f_{1,4,0} = 127.4$  Hz.

Das Luftvolumen schwingt in sämtlichen Raummoden. Daher können die Ersatzmodelle die Realität nicht abbilden. Selbst unter Ansatz einer Massenverteilung bilden diese lediglich die



**Abbildung 8.19:** Ortsbereiche an der Resonanz bei 135 Hz

Moden in vertikaler Richtung ab und vernachlässigen die horizontalen Raummoden. Wie in Abbildung 8.17 zu erkennen, befinden sich im betrachteten Frequenzbereich bis 300 Hz eine Vielzahl dieser Moden, was sich ebenfalls überschlägig nach Gleichung 8.8 nachweisen lässt. Diesbezüglich spielen vor allem die Abmessungen der Konstruktion eine entscheidende Rolle.

Die schwingende Luft regt die Gipsfaserplatten der Unterdecke an, welche daraufhin überwiegend in Wellenzahlkombinationen entsprechend ihrer Biegewellenzahl schwingt. Diesen überlagert werden auch Schwingungen in den Biegewellenzahlen der jeweiligen Raummode erzeugt. Obwohl im Schwingmuster 8.19 (links) nicht auszumachen, tragen jedoch gerade diese Schwingungen maßgeblich zur Schallabstrahlung bei, da deren Wellenzahlen naturgemäß exakt auf dem Kreis mit Radius  $k_A$  liegen, bei dem, wie bereits in Kapitel 7.4.1 beschrieben, der wellenzahl-abhängigen Term  $K(k_x, k_y, f)$  aus Gleichung 7.3 gegen unendlich strebt. Dadurch werden diese Wellenzahlen überproportional stark gewichtet.

Dies bedeutet, dass ab einem Frequenzbereich in dem eine hohe Raummodendichte des Luftvolumens herrscht, die Schallabstrahlung der Unterdecke maßgeblich vom Luftvolumen abhängig ist. Für die betrachtete Decke ist dies bereits ab etwa 100 Hz der Fall. Diese Erkenntnis wirft gleichwohl die Frage auf, inwieweit eine Änderung der charakteristischen Werte der Abhänger, sowie deren Verteilung oder Abhängehöhe für die Verbesserung der vibroakustischen

Eigenschaften der Unterdecke überhaupt relevant sind.

### 8.4.4 Kalibrierung der Dämpfung und Abgleich mit Messergebnissen

Bei der Simulation der Brettsperrholzdecke mit Unterdecke und Luftvolumen abgebildet mit Fluidelementen in Abschnitt 8.4.2 werden Dämpfungseffekte innerhalb des Luftvolumens und an den Rändern vernachlässigt. In ANSYS® besteht die Möglichkeit diese über den Faktor  $\mu_{\text{air}}$  mithilfe von Impedanzrandbedingungen zu berücksichtigen. Wie bereits in Kapitel 7.2.6 erwähnt wird dieser iterativ zu  $\mu_{\text{air}} = 0.03$  bestimmt.

In Abbildung 8.20 sind die Übertragungsfunktionen der berechneten Schalleistung aus Messdaten und Simulation für die Brettsperrholzdecke mit Unterdecke dargestellt. Durch die Berücksichtigung der Dämpfung werden die Resonanzspitzen im Bereich der Raummoden des Luftvolumens deutlich reduziert. Dadurch wird eine gute Übereinstimmung von Simulation und Messung erreicht.

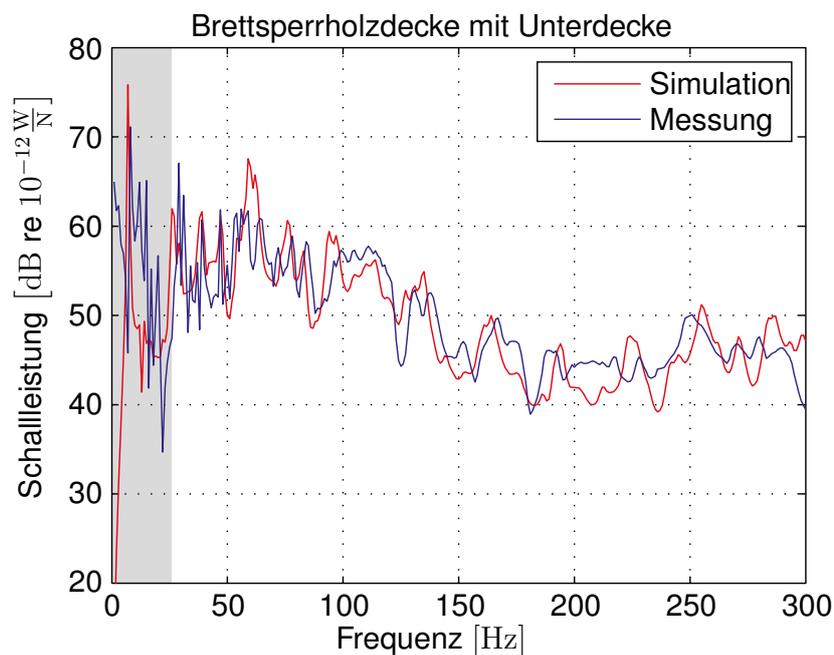


Abbildung 8.20: Vergleich Messung/Simulation für BSD mit Unterdecke

Abschließend werden auf gleiche Weise die Ergebnisse für die Holzbalkendecke mit Unterdecke gegenüber gestellt. Auch hier ist ohne weitere Anpassung der Modelle eine gute Übereinstimmung gegeben. Damit kann das Modell der Unterdecke modular eingesetzt werden.

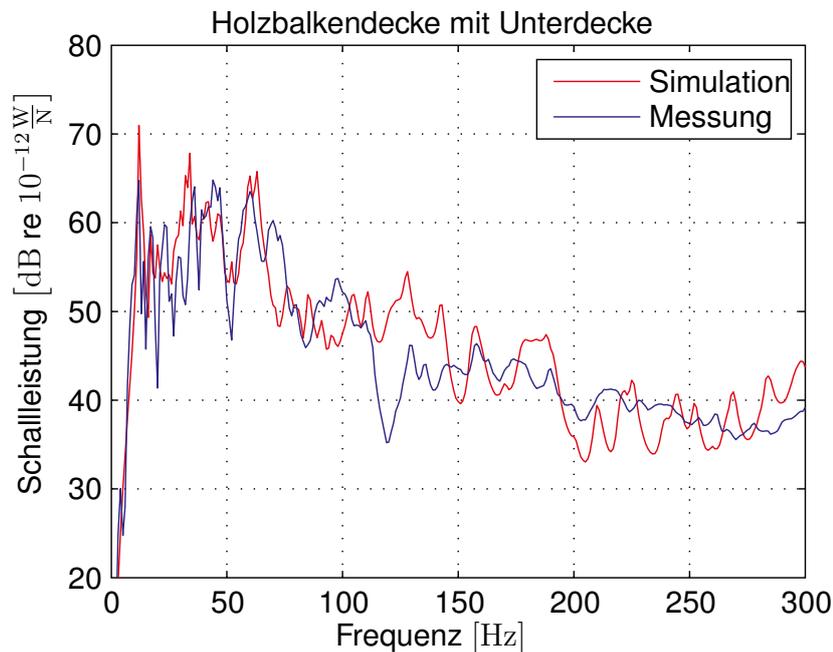
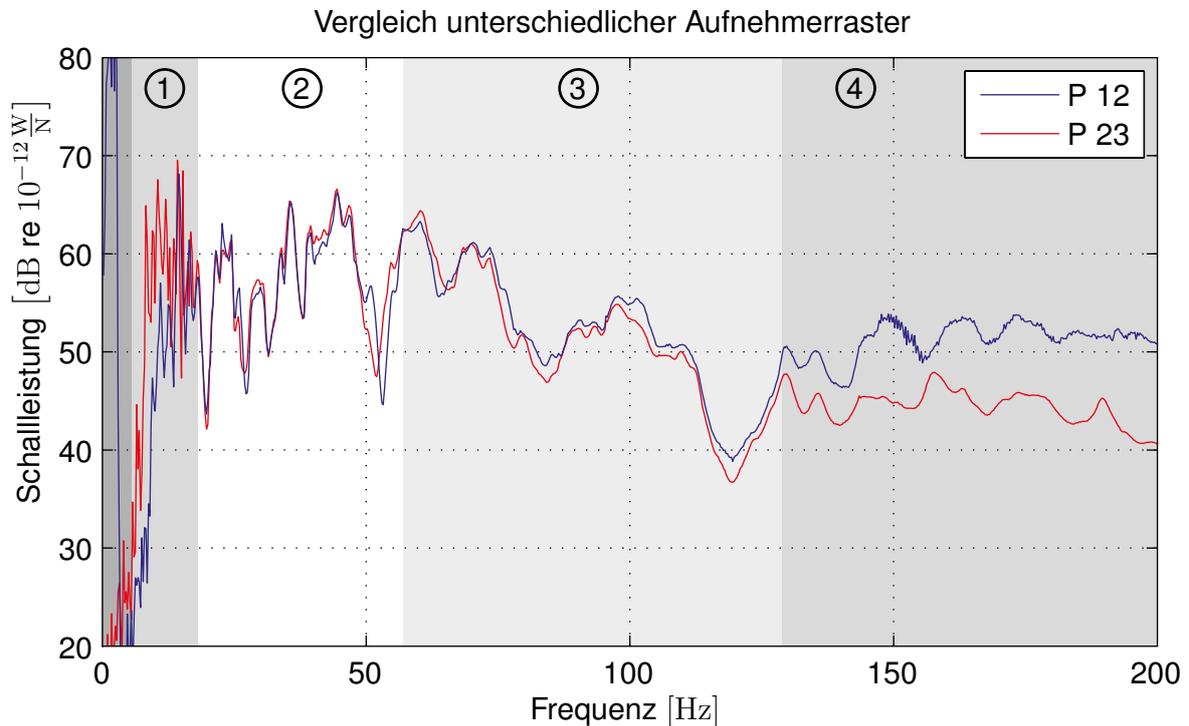


Abbildung 8.21: Vergleich Messung/Simulation für HBD mit Unterdecke

## 8.5 Grenzen der Anwendbarkeit

Das vorgestellte Modell zur Ermittlung der abgestrahlten Schalleistung aus der Körperschallschnelle ist nicht uneingeschränkt auf alle Messdaten anwendbar. Zum einen unterliegt es, unter anderem auch wegen der Ermittlung der Transfer-Schalleistung bezüglich der eingebrachten Anregekraft, der Begrenzung, dass nur die Schalleistung in den Frequenzbereichen ermittelt werden können, in dem der Struktur durch einen Schwingerreger, Lautsprecher oder Ähnlichem Energie zugeführt wird. Andererseits müssen, da es sich um ein diskretes Verfahren handelt, analog zur Messung im Zeitbereich, je nach zu betrachtendem Frequenzbereich Mindestabstände bei der Diskretisierung der Messpunkte eingehalten werden, um räumliches Aliasing zu vermeiden. Besonders der Umstand, dass im Gegensatz zur Messung im Zeitbereich kein Tiefpassfilter möglich ist, ist hierbei zu beachten. Zur Verdeutlichung dieser Einschränkungen werden zwei Messungen an der selben Struktur im selben Ausbauzustand mit unterschiedlichem Aufnehmerraster und Anregerfrequenzen verglichen. Abbildung 8.22 zeigt die abgestrahlte Transfer-Schalleistung an der Holzbalkendecke mit abgehängter Decke für Aufnehmerabstände von 0.5 m (12 × 12 Aufnehmer) mit einem Anregefrequenzbereich von 4 – 200 Hz und 0.25 m (23 × 23 Aufnehmer) mit einem Anregefrequenzbereich von 16 – 200 Hz. Analog zum Shannon-Kriterium bedeutet dies, dass mit diesen Auflösungen Wellenzahlbereiche bis  $6.24 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$



**Abbildung 8.22:** Transfer Schallleistung; Vergleich des Einflusses der Aufnehmerabstände

bzw.  $12.48 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$  gemessen werden können.

$$k_{x,max,12} = k_{y,max,12} = \frac{2\pi}{2 \cdot 0.5\text{m}} = 6.24 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$$

$$k_{x,max,23} = k_{y,max,23} = \frac{2\pi}{2 \cdot 0.25\text{m}} = 12.48 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$$

Diese Grenzen sind in [Abbildung 8.23](#) im Diagramm der gemessenen und analytisch ermittelten Biegewellenzahlen für die Unterdecke eingetragen. Das Diagramm zeigt einen Ausschnitt der bereits in [Abschnitt 8.3](#) vorgestellten Daten, die mit einem Aufnehmerraster von 0.125 m gemessen wurden. Fällt man das Lot von den jeweiligen Schnittpunkten der Wellenzahlgrenzen mit den Kurven im Diagramm, so wird deutlich, dass bei einem Messraster von 0.25 m ein Frequenzbereich bis etwa 200 Hz und bei einem Messraster von 0.5 m ein Frequenzbereich bis maximal etwa 60 Hz erfasst werden kann.

Analytisch ergibt sich nach diesen Kriterien die maximal messbare obere Frequenzgrenze aus

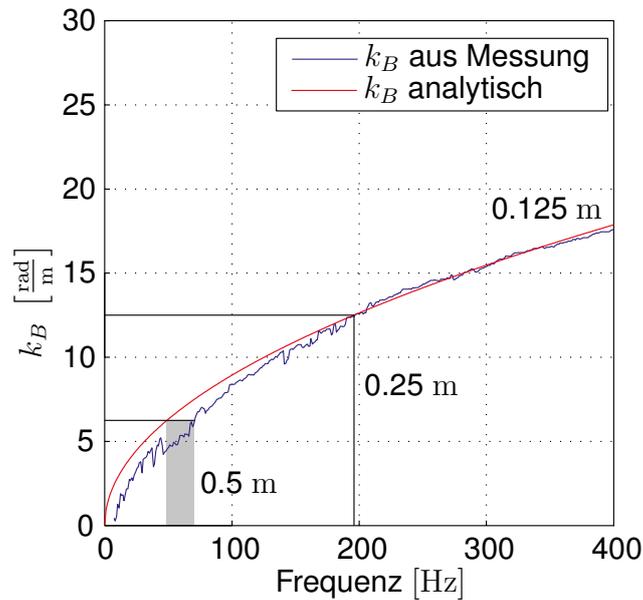


Abbildung 8.23: Shannon Kriterium im Wellenzahlbereich

der Bedingung

$$k_{x,max} \geq k_B \quad (8.9)$$

zu

$$2\pi \cdot f_{max} = \frac{k_{x,max}^2}{a} \quad (8.10)$$

mit  $a = \frac{k_B^2}{2\pi f} = \sqrt{\frac{12\rho}{E \cdot d^2}}$ . Somit lassen sich die oben grafisch ermittelten Grenzen analytisch berechnen zu:

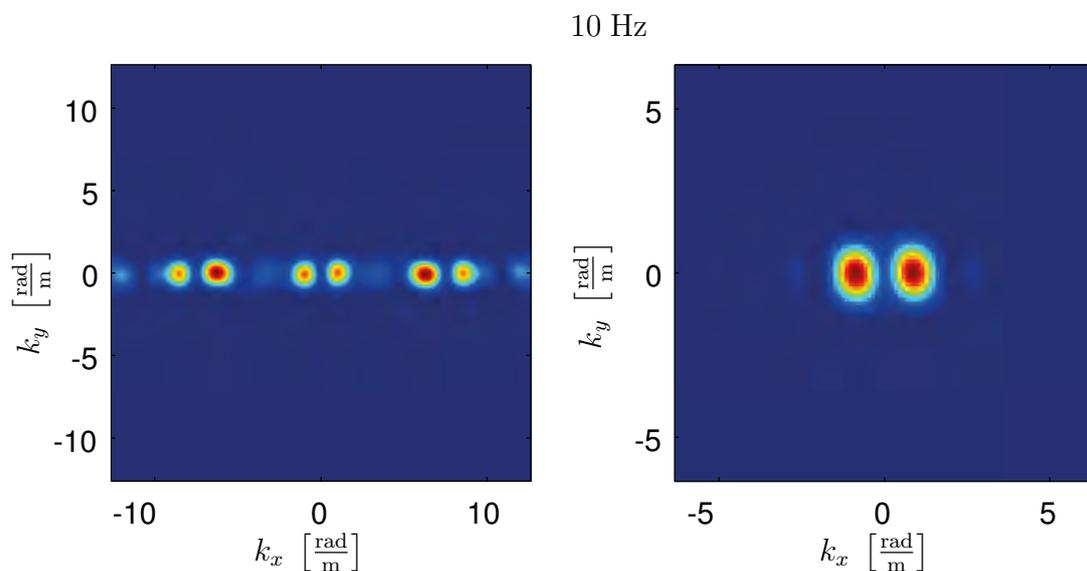
$$f_{max,12} = 49.5 \text{ Hz} \quad \text{und} \quad f_{max,23} = 198.0 \text{ Hz}$$

Im letzteren Fall ist zu beachten, dass die Annahme einer unendlichen Platte für die analytische Lösung zu einer großen Abweichung der beiden Kurven und somit auch zu unterschiedlichen Frequenzgrenzen führt (grau hinterlegt).

Aus den Verläufen *P 12* und *P 23* in Abbildung 8.22 und unter Berücksichtigung der oben ermittelten Frequenzgrenzen lassen sich vier Frequenzbereiche identifizieren, für die in den Abbildungen 8.24 bis 8.27 jeweils exemplarisch die Körperschallschnellespektren im Wellenzahlbereich

für spezifische Frequenzen dargestellt sind. Unterhalb von 4 Hz erfolgte bei beiden Messungen keine Anregung. Für unendlich ausgedehnte isotrope Platten – mit unendlicher modaler Dichte – weisen die im Wellenzahlbereich  $k_x$ - $k_y$  dargestellten Schwingantworten Maxima in einem durch die Gleichung  $k_x^2 + k_y^2 = k_B^2$  beschriebenen Kreis auf. Bei anisotropen Platten wird aus dem Kreis eine Ellipse.

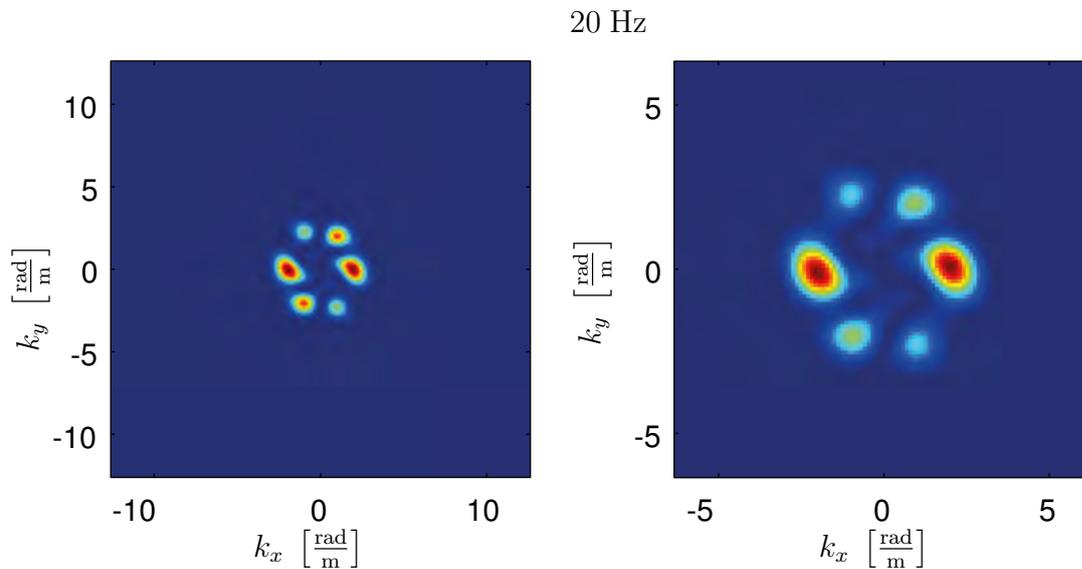
Bei endlichen Platten ergeben sich die Formen nach Faltung mit der Fouriertransformierten eines Rechteckfensters in  $x$ - und  $y$ -Richtung zu einzelnen Maxima (vgl. Abb. 6.6 und 6.7). Diese können den Eigenschwingformen der endlichen Platte zugeordnet werden.



**Abbildung 8.24:** Bereich 1  
 P23 (23 × 23 Aufnehmer)                      P12 (12 × 12 Aufnehmer)

**Bereich 1:** (4 Hz – 16 Hz)

In diesem Bereich liefert nur  $P$  12 brauchbare Ergebnisse, da nur bei dieser Messung in diesem Frequenzbereich Energie eingebracht wurde. In Abbildung 8.24 sind die Wellenzahlspektren beider Messungen in der Nähe einer Eigenfrequenz der Unterdecke bei 10 Hz dargestellt. Für  $P$  12 (rechts) zeigt das Spektrum die beiden für diese Eigenform charakteristischen Spitzen. Diese sind für  $P$  23 zwar ebenfalls zu erkennen, werden jedoch durch Artefakte überlagert, die durch den Phasenfehler infolge des fehlenden Kraftsignals entstehen. Die annähernde Übereinstimmung der Kurven in diesem Bereich ist daher eher zufälliger Natur.



**Abbildung 8.25:** Bereich 2  
 P23 (23 × 23 Aufnehmer)                      P12 (12 × 12 Aufnehmer)

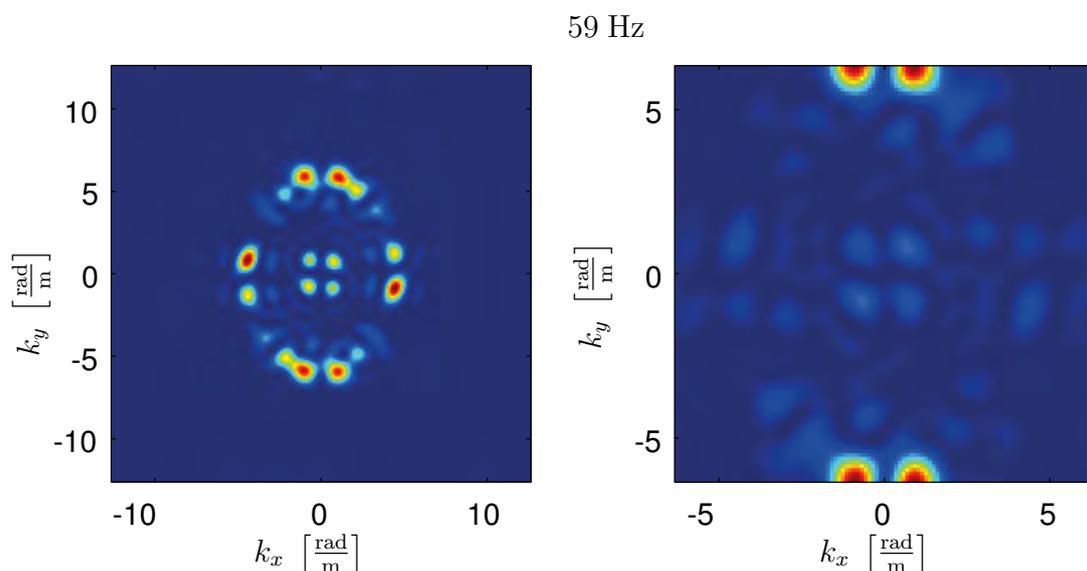
**Bereich 2:** (16 Hz – ca. 60 Hz)

In diesem Bereich wird sowohl für  $P 12$  als auch für  $P 23$  das Shannon-Kriterium eingehalten. Abbildung 8.25 zeigt die Wellenzahlspektren bei 20 Hz. Klar erkennbar ist die typische kreisförmige Anordnung der Amplitudenspitzen jeweils innerhalb der Wellenzahlgrenzen und eine sehr gute Übereinstimmung beider Messungen. Daraus resultiert gleichermaßen die sehr gute Übereinstimmung der Schalleistungen in diesem Bereich.

**Bereich 3:** (ca. 60 Hz – ca. 130 Hz)

Obwohl das Shannon-Kriterium in Bereich 3 für  $P 12$  nicht mehr eingehalten wird, zeigt sich in diesem Bereich dennoch eine gute Übereinstimmung der ermittelten Schalleistungskurven. Beim Vergleich der Wellenzahlspektren in Abbildung 8.26 an der Bereichsgrenze bei 59 Hz wird deutlich, dass die BiegeWellenzahl der Beplankung bei  $P 12$  im Gegensatz zu  $P 23$  (links) bereits den Rand des messbaren Wellenzahlbereiches erreicht hat. Gleichzeitig sind bei  $P 23$  bereits deutliche Amplituden im Bereich der Wellenzahl der Luft zu erkennen. Die dennoch gute Übereinstimmung begründet sich darin, dass nur diejenigen Wellenzahlen für die Berechnung der Schalleistung relevant sind, die innerhalb des Kreises mit Radius der Wellenzahl der Luft liegen. Eine Störung durch Aliasing wirkt sich in diesem Frequenzbereich jedoch nur am Rand des

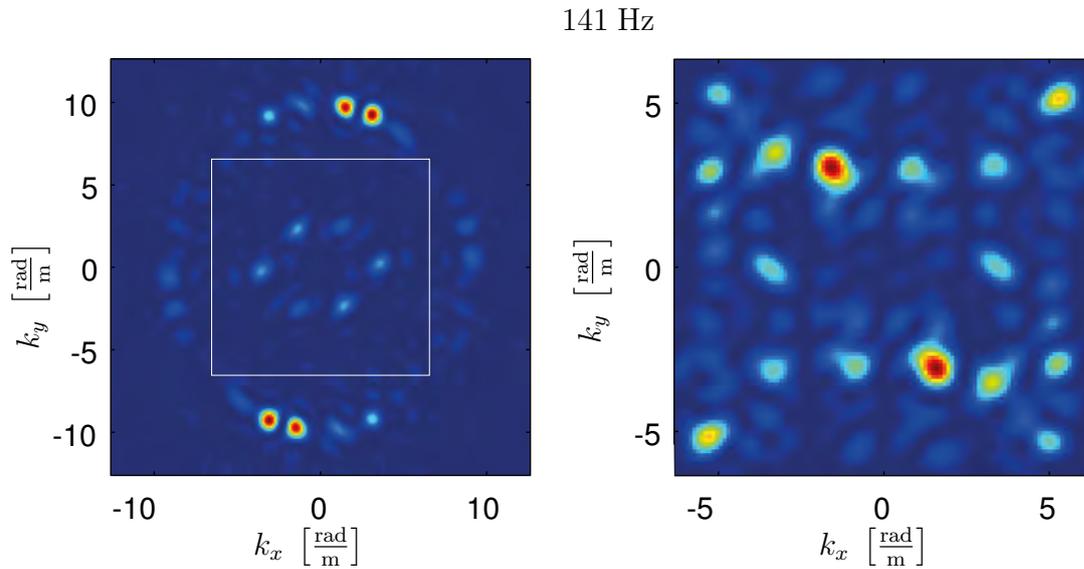
Wellenzahlbereiches aus, der ohnehin mit Null multipliziert wird. Die unterschiedlichen Beträge der Amplituden beider Messungen am Rand wird durch eine Verfälschung und Überhöhung infolge des Aliasing-Effekts erzeugt. Im restlichen Spektrum ergeben sich in der Darstellung farbliche Unterschiede lediglich aus der unterschiedlichen Skalierung. Bemerkenswert ist zudem die elliptische Form auf der die Amplitudenspitzen liegen. Dies ist zurückzuführen auf die anisotrope Anordnung der Traglattung, auf der die Beplankung befestigt ist. Diese führt in diesem Frequenzbereich zu einer nicht unerheblich unterschiedlichen Steifigkeit in Deckenlängs- und -querrichtung, wodurch die im isotropen Fall kreisförmige in eine elliptische Form übergeht.



**Abbildung 8.26:** Bereich 3  
 P23 (23 × 23 Aufnehmer)                      P12 (12 × 12 Aufnehmer)

#### Bereich 4 (ab ca. 130 Hz)

In diesem Bereich gehen die Kurven deutlich auseinander. Stellvertretend für diesen Bereich sind in Abbildung 8.27 die Wellenzahlspektren der Körperschallschnelle bei 141 Hz dargestellt. Wiederum ist im linken Bild für die Messung *P* 23 zu erkennen, dass der Kreis der BiegeWellenzahl den Rand des abgetasteten Wellenzahlbereiches noch nicht erreicht hat, beim Vergleich mit dem Wellenzahlbereich von *P* 12 (weißes Quadrat) wird deutlich, dass dieser deutlich überschritten wird. Die Wellenzahl der Luft liegt hier bereits bei ca.  $2.5 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$ , erkennbar an den Amplituden innerhalb des weißen Quadrats. Durch den Aliasing-Effekt werden die Amplituden der Wellenzahlen außerhalb dieses Quadrates bei *P* 12 als Artefakte an der Bereichsgrenze reflek-



**Abbildung 8.27:** Bereich 4  
 P23 (23 × 23 Aufnehmer)                      P12 (12 × 12 Aufnehmer)

tiert (wiederholt) und überlagern hier bereits große Bereiche des Wellenzahlspektrums. Insbesondere erreichen die hohen Amplituden resultierend aus der BiegeWellenzahl der Beplankung dadurch den Kreis um den Ursprung mit dem Radius der Wellenzahl der Luft, welcher für die Berechnung relevant ist. Dadurch werden in Bereich 4 für  $P 12$  die Berechnungsergebnisse für die abgestrahlte Schallleistung stark verfälscht. Die Ergebnisse sind hier somit unbrauchbar.

Als ein Kriterium für den erweiterten Bereich nutzbarer Messdaten jenseits der Grenze die das Shannon-Kriterium vorgibt, wird für plattenförmige Strukturen folgendes vorgeschlagen:

$$2 \cdot k_{max} \geq k_B + k_A \quad (8.11)$$

aufgelöst nach der oberen Frequenzgrenze ergibt sich daraus

$$2\pi \cdot f_{max} = \frac{c_A}{2} \left( a^2 c_A + \sqrt{c_A^2 a^4 + 8c_A a^2 k_x + 4k_x} \right), \quad (8.12)$$

wobei bei anisotropen Materialeigenschaften die Richtung der geringsten Steifigkeit maßgebend wird. Für  $d_x = 0.5$  m ergibt sich der maximal auswertbare Frequenzbereich zu:

$$f_{max,12} = 129.7 \text{ Hz}$$



# 9 Beschreibung der Simulationen und Ergebnisauswertung

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Parameterstudien vorgestellt. Dazu wird zunächst das generelle Vorgehen zur Durchführung der Studien sowie die ausgewählten Parameter und deren Parameterbereiche erläutert. Es werden zwei Arten von Parameterstudien erstellt, die sich hinsichtlich ihrer späteren Verwendung unterscheiden. Einerseits wird der Einfluss einzelner Parameter auf die abgestrahlte Schalleistung des Gesamtsystems untersucht, wodurch es ermöglicht wird, bereits in der Planungsphase Aussagen über das zu erwartende vibroakustische Verhalten der Decke zu treffen. Andererseits wird ein Katalog an Übertragungsfunktionen für relevante Parameterkombinationen erstellt, der als Datenbasis für eine grafische Benutzeroberfläche dient, mithilfe derer Prognosen für unterschiedliche Anregesignale möglich werden.

## 9.1 Parameterstudien

Die für die Studien verwendeten numerischen Modelle in ANSYS<sup>®</sup> werden in Kapitel 7 erläutert. Wie dort beschrieben, sind sämtliche Modelle vollständig parametrisiert und für eine Automatisierung optimiert. Die eigentliche Parameterstudie macht das wiederholte Starten von Rechendurchläufen und eine kontinuierliche Änderung der Parameterkombinationen notwendig. Diese Abläufe gestalten sich in ANSYS<sup>®</sup> schwierig, weshalb eine Schnittstelle zu MATLAB<sup>®</sup> programmiert wird, was eine Steuerung der Analysen in der deutlich übersichtlicheren Programmierumgebung von MATLAB<sup>®</sup> möglich macht. Zudem wird dadurch eine vollständige Automatisierung der Simulation bis hin zur Anwendung des in Abschnitt 7.4.1 vorgestellten akustischen Auswertemodells ermöglicht.

## 9.1.1 Ablauf und Programmierung in MATLAB®

Für den Ablauf der Parameterstudien wird ein dreistufiges Ansatz verfolgt.

### 9.1.1.1 Stufe 1

Bevor eine Studie durchgeführt werden kann, werden zunächst die relevanten Parameter identifiziert und deren Parameterbereiche abgesteckt. Je nach Verwendungszweck der Studien werden dabei unterschiedliche Parameter bei Festhaltung der weiteren Parameter variiert. Bei der Eingrenzung der Parameterbereiche spielen sowohl die baupraktische Relevanz wie auch der Rechenaufwand eine Rolle. Insbesondere bei den Modellen beziehungsweise Ausbauständen für die bei der harmonischen Frequenzanalyse keine modale Superposition verwendet werden kann, liegt ein erheblich erhöhter Rechenaufwand vor, was die Anzahl der möglichen Parameterkombinationen stark einschränkt.

Da der Rechenaufwand auch aufgrund der Modellgröße und somit der Anzahl der Freiheitsgrade variiert, lässt sich dieser nur grob angeben. Er beträgt in Abhängigkeit der Analyseverfahren:

- Modale Superposition: ca. 1 – 10 Minuten
- Vollständige Lösung: ca. 1 – 6 Stunden

Ist eine Auswahl an Parameterkombinationen getroffen, werden diese in MATLAB® in einer Matrix abgelegt, die sowohl als Steuerungselement für die Simulationen als auch bei der späteren Auswertung zur Identifikation der jeweiligen Ergebnisse dient.

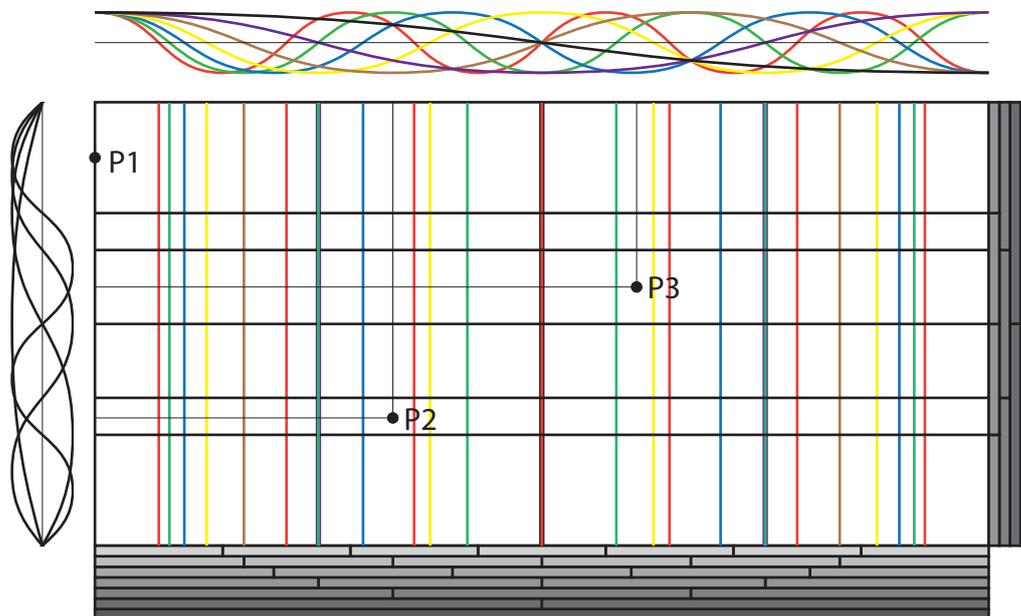
### 9.1.1.2 Stufe 2

In Kapitel 7 wird erläutert, dass jedem Modul der numerischen Modellierung ein Unter-Modul zugeordnet wird, das die jeweils benötigten Parameter enthält. Der Vorteil dieser Anordnung zeigt sich bei der Parameterstudie. Diese Untermodule sind einfache Textdateien, die auch von MATLAB® erstellt werden können. Diese werden in jedem Rechenschritt aufgerufen und je nach Parameterkombination mit geänderten Daten abgespeichert. Auf diese Weise können die Systemparameter der numerischen Modelle geändert werden, ohne dass die Hauptmodule verändert werden müssen, was zu einem robusteren Ablauf der Studien führt.

Nach der Übergabe der neuen Parameter wird aus MATLAB<sup>®</sup> heraus die ANSYS<sup>®</sup> Simulation gestartet. Die dazu benötigte Stapelverarbeitungsdatei, die den Namen der Ausgabedatei und den Speicherort beinhaltet wird zuvor ebenfalls in MATLAB<sup>®</sup> erstellt. In ANSYS<sup>®</sup> werden nach jedem Rechenschritt wie bereits in Abschnitt 7.3.2.4 erläutert Verschiebungs- und Geometriedaten in Form von Textdateien abgelegt, auf die wiederum von MATLAB<sup>®</sup> zugegriffen werden kann. Die berechneten Eigenfrequenzen werden aus der von ANSYS<sup>®</sup> standardmäßig erzeugten Ausgabedatei extrahiert und in der Steuerungsmatrix gespeichert und damit der entsprechenden Parameterkombination zugeordnet.

### 9.1.1.3 Stufe 3

Im Anschluss an die ANSYS<sup>®</sup> -Berechnung werden die Verschiebungs- und Geometriedaten der jeweiligen Rechnung in MATLAB<sup>®</sup> importiert und das akustische Auswerteverfahren darauf angewandt. Die Ergebnisse der Auswertung werden anschließend je nach gewähltem Ausbauzustand zusammen mit der zugehörigen Steuerungsmatrix archiviert.



**Abbildung 9.1:** Einteilung der Anregepositionen

## 9.1.2 Parameterauswahl

In Kapitel 7 werden alle Parameter der Modelle vorgestellt und in drei Gruppen aufgeteilt. Für die Parameterstudien werden überwiegend die geometrischen Parameter variiert, da es sich bei den Material- und Modellparameter bereits um anhand von Messdaten kalibrierte Größen handelt oder diese aus der Literatur entnommen sind. Eine Ausnahme bildet hierbei der Absorptionsgrad der Berandung der Luftschicht innerhalb der abgehängten Decke. Da die in Abschnitt 7.3.2.3 beschriebene stochastische Anregung aufgrund des sehr hohen Rechenaufwands für eine Parameterstudie nicht in Frage kommen werden Berechnungen an drei unterschiedlichen Anregepositionen durchgeführt (s. Abb. 9.1). Die Positionen sind dabei so gewählt, dass ein möglichst großer räumlicher Abstand zu relevanten Schwingungsknoten vorliegt.

Nachfolgend sind die relevanten Parameter aufgeführt, wobei zu beachten ist, dass je nach Haupttragsystem unterschiedliche spezifische Parameter betrachtet werden müssen. Bei den durchgeführten Parameterstudien werden nur die Brettsperrholz- und Holzbalkendecken berücksichtigt. Es wird nur eine Estrich-Variante betrachtet (s. Abschnitt 7.2.5).

- Spezifische Parameter der Brettsperrholzdecke:
  - Deckentyp: es stehen 28 verschiedene Typen zur Auswahl
  - Anzahl Plattenstreifen
- Spezifische Parameter der Holzbalkendecke:
  - Deckentyp: Einzel- und Doppelbalken
  - Balkenabstand
- Übergreifende Parameter:
  - Ausbauzustand
  - Anregeposition
  - Länge
  - Breite: wird über das Längenverhältnis  $\alpha = \frac{l}{b}$  ausgedrückt
  - Abhängehöhe
  - Abhängerabstand, einschließlich Abstand der Grund- und Traglattung

- Absorptionsgrad der Berandung

### 9.1.3 Durchgeführte Studien

Die Anzahl der Parameterkombinationen steigt mit jedem zusätzlichen zu variierenden Parameter exponentiell an. Dies führt aufgrund der begrenzten Rechenkapazitäten zu der Notwendigkeit einer Vorauswahl. Um dennoch möglichst alle Einflüsse der jeweiligen Parameter beurteilen zu können, werden für einige Parameter spezialisierte Parameterstudien (PS-SP) durchgeführt. Die Parameterstudien für den Datenkatalog der grafischen Benutzeroberfläche wird im folgenden mit PS-GUI abgekürzt. Insbesondere auf die Variation der Parameter der Unterdecke wird für diese Parameterstudien verzichtet.

#### 9.1.3.1 Parameterstudien an der Brettsperrholzdecke

Für sämtliche Parameterstudien an der Brettsperrholzdecke werden folgende Eingrenzungen getroffen:

- Die Breite der Plattenstreifen liegt innerhalb folgender Grenzen:

$$1.0 \text{ m} \leq b_{\text{platte}} \leq 2.5 \text{ m}$$

- Die rechnerische erste Eigenfrequenz eines idealisierten Balkens  $f_{\text{beam}} = \frac{\pi n^2}{2l_x^2} \sqrt{\frac{EI_y}{\mu}}$  liegt innerhalb folgender Grenzen:

$$6.0 \text{ Hz} \leq f_{\text{beam}} \leq 15.0 \text{ Hz}$$

Dies hat zur Folge, dass in guter Näherung baupraktisch relevante Parameterkombinationen berechnet werden. Ein Nachteil der Eingrenzung ist, dass beispielsweise beim Vergleich der Ergebnisse für große Längen für kleinere Querschnitte keine Ergebnisse vorliegen.

**PS-SP (BSD R alle Typen)** Mit 28 verschiedenen Typen von Brettsperrholzdecken stehen hier eine große Zahl von Modellierungsoptionen zur Verfügung. Diese unterscheiden sich in der Anzahl der Brettlagen und deren jeweiliger Orientierung, was sich im Steifeverhältnis  $\frac{EI_x}{EI_y}$  widerspiegelt. Der Einfluss dieses Parameters auf die Eigenfrequenzen und die abgestrahlte Schallleistung wird mithilfe einer Parameterstudie an der Rohdecke durchgeführt. Hierfür werden die

Modelle an der Anregeposition  $P1$  angeregt. Die übrigen Parameterbereiche lassen sich Tabelle 9.1 entnehmen. Durch die oben genannte Eingrenzung lässt sich die Anzahl der Parameterkombinationen von 15444 auf 4853 reduzieren. Zusätzlich wird die Anzahl der Deckentypen auf repräsentative Querschnitte begrenzt. Für die Analysen kann eine modale Superposition verwendet werden, wodurch der Rechenaufwand auf etwa 10 Tage begrenzt werden kann.

**Tabelle 9.1:** Geometrische Parameter für Parameterstudie (BSD-R alle Typen)

| Parameter  | Werte  | Anzahl = Faktor |
|--|--|-----------------|
| <b>Länge</b> [m]                                   | [4.0; 4.5; 5.0; 5.5; 6.0; 6.5; 7.0; 7.5; 8.0]  | ×9              |
| <b>Deckentyp</b>                                   | [51; 61; 71; 81; 93; 99; 85; 95; 105; 115; 125; 135; 147; 153; 165; 174; 186; 189; 201; 207; 219; 231; 240; 252; 264; 273; 285; 297] | ×28             |
| <b>Anzahl Platten</b> [–]                          | [2; 3; 4; 5; 6; 7]   | ×6              |
| <b>Längenverhältnis</b> [–]                        | [1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.6; 1.7; 1.8; 1.9; 2.0]  | ×11             |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen (vor Begrenzung):</b> |  | 15444           |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen (final):</b>          |  | 4853            |

**PS-SP (BSD RU+RUE Typ 165)** Da für die PS-GUI auf eine Variation der Parameter der abgehängten Decke verzichtet wird, wird für die Untersuchung des damit verbundenen Einflusses eine separate Parameterstudie durchgeführt. Während für die Studie zuvor lediglich vier Parameter variiert werden mussten, kommen hier fünf weitere Parameter hinzu (s. Tabelle 9.2). Da bei der Berechnung der Luft im Zwischenraum Fluidelemente eingesetzt werden, ist eine modale Superposition zudem nicht möglich. Aus diesem Grund werden die Parameterbereiche stark eingegrenzt. Die Berechnungen werden am Deckentyp 165 und unter Annahme einer durchgehenden Platte durchgeführt. Dabei ergeben sich 216 Rechnungen, was einer Rechendauer von etwa 24 Tagen entspricht.

**Tabelle 9.2:** Parameter für Parameterstudie (BSD RU+RUE Typ 165)

| <b>Parameter</b>                     | <b>Werte</b>           | <b>Anzahl = Faktor</b> |
|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Länge</b> [m]                     | [4.0; 5.0]             | ×2                     |
| <b>Längenverhältnis</b> [–]          | [1.0; 1.5]             | ×2                     |
| <b>Estrich</b>                       | [ja; nein]             | ×2                     |
| <b>Abhängehöhe</b> [m]               | [0.12; 0.2]            | ×2                     |
| <b>Abhängerraster</b> [m]            | [0.5 × 0.5; 1.0 × 1.0] | ×2                     |
| <b>Abhänger</b>                      | [ja; nein]             | ×1.5 (nur 1.0 × 1.0)   |
| <b>Absorptionsrate Berandung</b> [%] | [0; 3; 10]             | ×3                     |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen:</b>    |                        | 216                    |

**PS-GUI (BSD)** Für die PS-GUI an der Brettsper Holzdecke werden die Parameter und zugehörigen Parameterbereiche der Tabellen 9.3 bis 9.5 verwendet. Im Vergleich zu 9.1.3.1 werden nur noch sechs repräsentative Deckentypen verwendet. Hier erfolgt die Berechnung nun für alle drei Anregepositionen was in etwa zu derselben Gesamtrechendauer im Falle der Rohdecke führt. Für die weiteren Ausbauzustände werden die Parameterbereiche entsprechend des zu erwartenden Mehraufwands reduziert. So wird im Falle der Rohdecke mit Estrich (RE) die Anzahl der Längenverhältnisse auf zwei begrenzt, für die Ausbauzustände mit Unterdecke (RU und RUE) werden zudem weniger Längen und wie in PS-SP (BSD RU+RUE Typ 165) eine durchgehende Deckenplatte für die Rohdecke angenommen. Für die Absorption der Berandung wird wiederum der in Abschnitt 7.2.6 iterativ bestimmte Wert von 3 % angenommen. Dadurch reduzieren sich die Anzahl der Parameterkombinationen je Anregeposition für die Rohdecke auf 1133, für die Rohdecke mit Estrich auf 226 und für die beiden Ausbauzustände mit abgehängter Decke auf 32.

**Tabelle 9.3:** Geometrische Parameter für Parameterstudie (BSD RD)

| Parameter  | Werte   | Anzahl = Faktor |
|--|---|-----------------|
| <b>Länge [m]</b>                                   | [4.0; 4.5; 5.0; 5.5; 6.0; 6.5; 7.0; 7.5; 8.0]           | ×9              |
| <b>Deckentyp</b>                                   | [71; 105; 147; 186; 219; 264]                           | ×6              |
| <b>Anzahl Platten [–]</b>                          | [2; 3; 4; 5; 6; 7]                                      | ×6              |
| <b>Längenverhältnis [–]</b>                        | [1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.6; 1.7; 1.8; 1.9; 2.0] | ×11             |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen (vor Begrenzung):</b> |   | 3580            |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen (final):</b>          |   | 1133            |

**Tabelle 9.4:** Geometrische Parameter für Parameterstudie (BSD RD FE/TE)

| Parameter  | Werte   | Anzahl = Faktor |
|--|---|-----------------|
| <b>Länge [m]</b>                                   | [4.0; 4.5; 5.0; 5.5; 6.0; 6.5; 7.0; 7.5; 8.0] | ×9              |
| <b>Deckentyp</b>                                   | [71; 105; 147; 186; 219; 264]                 | ×6              |
| <b>Anzahl Platten [–]</b>                          | [2; 3; 4; 5; 6; 7]                            | ×6              |
| <b>Längenverhältnis [–]</b>                        | [1.0; 1.5]                                    | ×2              |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen (vor Begrenzung):</b> |   | 648             |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen (final):</b>          |   | 226             |

**Tabelle 9.5:** Geometrische Parameter für Parameterstudie (BSD RD UD, RD UD FE/TE)

| Parameter  | Werte                         | Anzahl = Faktor |
|--|-------------------------------|-----------------|
| <b>Länge [m]</b>                                   | [4.0; 5.0; 6.0; 7.0; 8.0]     | ×5              |
| <b>Deckentyp</b>                                   | [71; 105; 147; 186; 219; 264] | ×6              |
| <b>Anzahl Platten [–]</b>                          | 1                             | ×1              |
| <b>Längenverhältnis [–]</b>                        | [1.0; 1.5]                    | ×2              |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen (vor Begrenzung):</b> |                               | 60              |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen (final):</b>          |                               | 32              |

### 9.1.3.2 Parameterstudien an der Holzbalkendecke

Neben den Parametern Länge und Längenverhältnis kommen für die Parameterstudien an der Holzbalkendecke die spezifischen Parameter der Holzbalkendecke hinzu. Der Parameter Bal-

kenabstand wird an Stelle der Anzahl der Felder oder Balken verwendet, um einigermaßen vergleichbare Ergebnisse bei vertretbarem Rechenaufwand zu produzieren. Letztere würden einen zu großen Parameterbereich benötigen. Der tatsächliche Balkenabstand wird in der Art angepasst werden, dass sein ganzzahliges Vielfaches der Gesamtbreite der Holzbalkendecke entspricht. Ein weiterer Unterschied zur Brettsper Holzdecke ist das Fehlen des Parameters Deckentyp im eigentlichen Sinne. Dieser wird durch die Breite der verwendeten Holzbalken ersetzt, wobei bei kleineren Längen die geringere Balkenbreite, bei großen Längen die größere Balkenbreite und ein Überlappungsbereich angesetzt wird.

**PS-GUI (HBD)** Für die PS-GUI an der Holzbalkendecke werden die Parameter und zugehörigen Parameterbereiche der Tabellen 9.6 bis 9.8 verwendet. Wie bereits in PS-GUI (BSD) werden für die unterschiedlichen Ausbauzustände mit steigender Komplexität des Modells die Parameterbereiche von in diesem Fall Balkenabstand und Längenverhältnis reduziert, wodurch sich die Anzahl der Parameterkombinationen je Anregeposition für die Rohdecke zu 440, für die Rohdecke mit Estrich zu 132 und für die beiden Ausbauzustände mit abgehängter Decke zu 44 ergeben. Die Anzahl der Simulationen für Rohdecke und Rohdecke mit Estrich ist gegenüber der Brettsper Holzdecke ebenfalls verringert, da aufgrund der verwendeten Kontaktelemente für alle Holzbalkendecken-Modelle mit vollständigen Matrizen gerechnet werden muss.

**Tabelle 9.6:** Geometrische Parameter für Parameterstudie (HBD RD)

| Länge [m]                         | Balkenabstand [m]                                       | Balkenbreite [m] | Anzahl/Faktor |
|-----------------------------------|---|------------------|---------------|
| 3                                 | [0.3; 0.4; 0.5; 0.6]                                    | 0.06             | 4             |
| 3.5                               | [0.3; 0.4; 0.5; 0.6]                                    | 0.06             | 4             |
| 4                                 | [0.3; 0.4; 0.5; 0.6]                                    | [0.06; 0.12]     | 8             |
| 4.5                               | [0.3; 0.4; 0.5; 0.6]                                    | [0.06; 0.12]     | 8             |
| 5                                 | [0.3; 0.4; 0.5; 0.6]                                    | [0.06; 0.12]     | 8             |
| 5.5                               | [0.3; 0.4; 0.5; 0.6]                                    | 0.12             | 4             |
| 6                                 | [0.3; 0.4; 0.5; 0.6]                                    | 0.12             | 4             |
| <b>Längenverhältnis</b>           | [1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.6; 1.7; 1.8; 1.9; 2.0] |                  | ×11           |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen:</b> |   |                  | 440           |

**Tabelle 9.7:** Geometrische Parameter für Parameterstudie (HBD RE)

| Länge [m]                         | Balkenabstand [m]              | Balkenbreite [m] | Anzahl/Faktor |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------|
| 3                                 | [0.5; 0.6]                     | 0.06             | 2             |
| 3.5                               | [0.4; 0.5; 0.6]                | 0.06             | 3             |
| 4                                 | [0.3; 0.4; 0.5]                | 0.06             | 4             |
|                                   | 0.6                            | 0.12             |               |
| 4.5                               | [0.3; 0.4]                     | 0.06             | 4             |
|                                   | [0.5; 0.6]                     | 0.12             |               |
| 5                                 | 0.3                            | 0.06             | 4             |
|                                   | [0.4; 0.5; 0.6]                | 0.12             |               |
| 5.5                               | [0.3; 0.4; 0.5]                | 0.12             | 3             |
| 6                                 | [0.3; 0.4]                     | 0.12             | 2             |
| <b>Längenverhältnis</b>           | [1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5] |                  | ×6            |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen:</b> |                                |                  | 132           |

**Tabelle 9.8:** Geometrische Parameter für Parameterstudie (HBD, RD UD, RD UD TE/FE)

| Länge [m]                         | Balkenabstand [m] | Balkenbreite [m] | Anzahl/Faktor |
|-----------------------------------|-------------------|------------------|---------------|
| 3                                 | [0.5; 0.6]        | 0.06             | 2             |
| 3.5                               | [0.4; 0.5; 0.6]   | 0.06             | 3             |
| 4                                 | [0.3; 0.4; 0.5]   | 0.06             | 4             |
|                                   | 0.6               | 0.12             |               |
| 4.5                               | [0.3; 0.4]        | 0.06             | 4             |
|                                   | [0.5; 0.6]        | 0.12             |               |
| 5                                 | 0.3               | 0.06             | 4             |
|                                   | [0.4; 0.5; 0.6]   | 0.12             |               |
| 5.5                               | [0.3; 0.4; 0.5]   | 0.12             | 3             |
| 6                                 | [0.3; 0.4]        | 0.12             | 2             |
| <b>Längenverhältnis</b>           | [1.0; 1.5]        |                  | ×2            |
| <b>Gesamtzahl der Rechnungen:</b> |                   |                  | 44            |

## 9.2 Auswertung der Simulationsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Parameterstudien ausgewertet. Dazu werden die einzelnen variierten Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die vibroakustischen Eigenschaften der Deckensysteme untersucht. Ziel dieser Betrachtung ist eine tabellarische Aufstellung positiver oder negativer Effekte bei Änderung der Parameterkombination, die eine Hilfestellung bei der Planung realer Deckensysteme geben soll. Für die Auswertung werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Wo möglich wird eine dimensionslose Darstellung der Messergebnisse nach dem in Abschnitt 6.4 vorgestellten Buckingham- $\pi$ -Theorem angestrebt. Für Studien, bei denen die Anzahl der Parameterkombinationen hierfür nicht ausreichend sind, werden Aussagen anhand von Vergleichen einzelner Simulationsergebnisse getroffen.

### 9.2.1 Dimensionslose Betrachtung der Parameterstudie (BSD RD alle Typen)

Zur Untersuchung der Parameter der Brettsperrholzdecke ohne Ausbauten werden Nomogramme bezüglich der Eigenfrequenzen des Systems und der Transferfunktion der abgestrahlten Schalleistung erstellt.

#### 9.2.1.1 Eigenfrequenz-Nomogramme

Sollen nur die Eigenfrequenzen betrachtet werden lassen sich folgende sieben dimensionsbehaftete Parameter identifizieren:

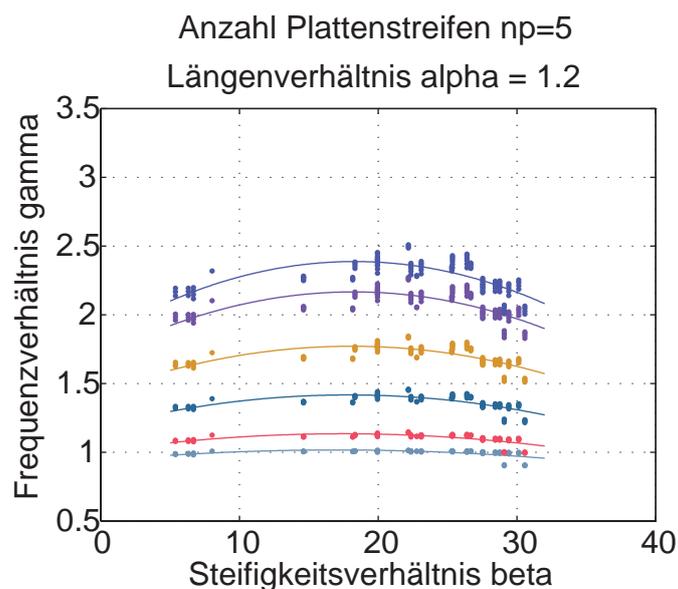
|                                |          |   |
|--------------------------------|----------|---|
| Länge                          | : $l$    | [m]   |
| Massebelegung                  | : $\mu$  | $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$     |
| Biegesteifigkeit in x-Richtung | : $EI_y$ | $\left[ \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} \right]$ |
| Biegesteifigkeit in y-Richtung | : $EI_x$ | $\left[ \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} \right]$ |
| Gesamtbreite                   | : $b$    | [m]   |
| Anzahl Plattenstreifen         | : $n_p$  | [—]   |
| Eigenfrequenz                  | : $f_i$  | $\left[ \frac{1}{\text{s}} \right]$               |

Wie in Abschnitt 6.4 erläutert lassen sich somit  $7 - 3 = 4$  dimensionslose Kenngrößen ermitteln, die das System beschreiben. Diese lauten folgendermaßen:

- Anzahl Plattenstreifen :  $n_p$
- Längenverhältnis :  $\alpha = \frac{l}{b}$
- Steifigkeitsverhältnis :  $\beta = \frac{EI_y}{EI_x}$
- Frequenzverhältnis :  $\gamma_i = \frac{f_i}{f_{\text{beam}}}$

wobei  $f_{\text{beam}}$  der ersten Biegeeigenfrequenz eines Euler Bernoulli Balkens entspricht

$$f_{\text{beam}} = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_y}{\mu}}$$



**Abbildung 9.2:** Exemplarische Darstellung eines Eigenfrequenz-Nomogramms

Abbildung 9.2 zeigt exemplarisch das Eigenfrequenz-Nomogramm für  $n_p = 5$  und  $\alpha = 1.2$ . In Anhang A.1 sind die übrigen Nomogramme dargestellt. Es werden in jedem Nomogramm die Frequenzverhältnisse  $\gamma_i$  über das Steifigkeitsverhältnis aufgetragen, wobei Eigenfrequenzen gleichen Index durch gleiche Farbgebung kenntlich gemacht werden. Zusätzlich wird eine quadratische Trendlinie eingefügt. Jedes Nomogramm stellt die Eigenfrequenzen für ein spezi-

fisches Frequenzverhältnis dar, je eine Doppelseite mit elf Nomogrammen repräsentieren die Unterteilung in die gleiche Anzahl an Plattenstreifen.

Ein Vergleich der Nomogramme zeigt:

- Die erste Biegeeigenfrequenz kann unabhängig von der Parameterkombination in sehr guter Näherung mithilfe eines Ersatzbalkens berechnet werden.
- Mit zunehmender Anzahl der Plattenstreifen nimmt die Anzahl der Eigenfrequenzen im Nahbereich der ersten Biegeeigenfrequenz zu.
- In Abhängigkeit der Steifigkeitsverhältnisse bilden die Eigenfrequenzen mit gleichem Index einen bogenförmigen Verlauf aus, zu dessen Enden hin die Eigenfrequenzdichte zunimmt. Eine maximale Streuung der Eigenfrequenzen wird bei etwa  $\beta = 22$  erreicht.
- Je größer das Längenverhältnis der Brettsper Holzdecken werden, desto dichter liegen die ersten Eigenfrequenzen des Systems beisammen. Gleichzeitig ist bei großen Längenverhältnissen der bogenförmige Verlauf schwächer ausgeprägt.

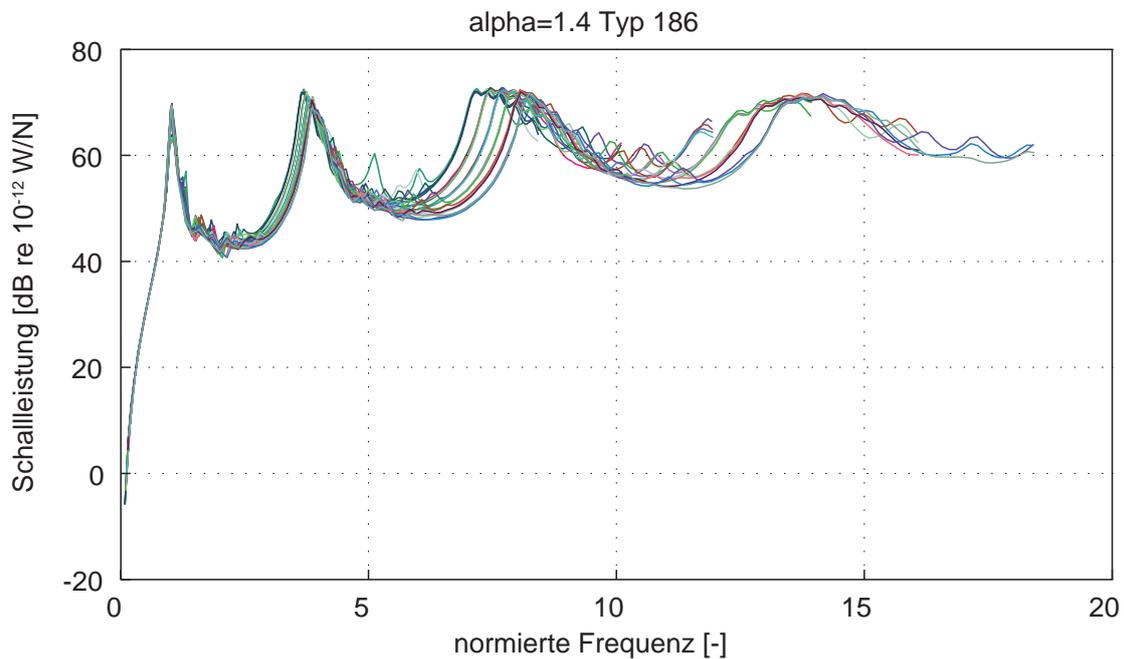
### 9.2.1.2 Schalleistungs-Nomogramme

Zu dimensionslosen Darstellung der Schalleistungen muss zusätzlich zu den oben genannten dimensionslosen Kenngrößen die Frequenzachse dimensionslos dargestellt werden. Hierzu bietet sich an, diese auf die erste Eigenfrequenz des Ersatzbalkens zu normieren, da sich bei der Auswertung der Eigenfrequenz-Nomogramme gezeigt hat, dass diese eine sehr gute Übereinstimmung mit den numerisch ermittelten ersten Eigenfrequenzen der für alle Deckentypen aufweisen. Die Schalleistung wird nicht dimensionslos dargestellt. Diese bietet bereits eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei einer gleichbleibenden Anregeposition.

Abbildung 9.3 zeigt exemplarisch die Überlagerung der Schalleistungen aller Parameterkombinationen des Deckentyps 186. Weitere Diagramme mit ausgewählten Parametersätzen sowie eine Überlagerung aller Simulationsergebnisse finden sich in Anhang A.2.1.

Beim Vergleich der Simulationsdaten zeigt sich:

- Sowohl Anzahl der Plattenstreifen als auch das Längenverhältnis beeinflussen die abgestrahlte Schalleistung nur in sehr geringem Maße. Obwohl die Anzahl der Eigenfrequenzen zunimmt, sind diese in der ermittelten abgestrahlten Schalleistung kaum zu erkennen.



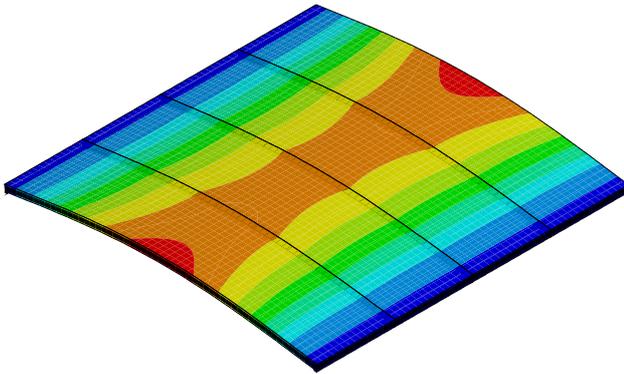
**Abbildung 9.3:** BSD-R Schalleistungs-Nomogramm:  
 Längenverhältnis  $\alpha = 1.4$   
 Steifigkeitsverhältnis  $\beta = 26.4$  (Deckentyp 186)  
 Variation von  $n_p$

- Bei gleichem Deckentyp bewirkt eine Erhöhung der Deckenlänge erst ab der dritten Biegeeigenfrequenz eine leichte Abweichung in den Nomogrammen. Der Wert der normierten Frequenz wird kleiner, die Amplitude bleibt jedoch auf dem selben Niveau.
- Eine Erhöhung der Deckenstärke hat im Vergleich zu den übrigen Parametern den größten Einfluss. Bereits bei der zweiten Biegeeigenfrequenz sind sowohl Abweichungen in der normierten Frequenz als auch in der Amplitude zu erkennen. Beide Werte werden mit zunehmender Deckenstärke geringer. Die Abweichungen sind jedoch nach wie vor gering.

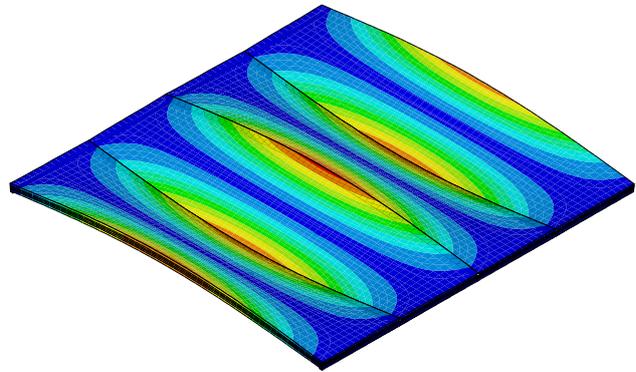
### 9.2.1.3 Einsatz von Tilgern im numerischen Modell

Wie im vorigen Abschnitt erwähnt, spielen bei der Brettsper Holzdecke ohne Ausbauten nur Biegeeigenformen (in Querrichtung bleiben die Querschnitte eben, siehe Abbildung 9.4) für die abgestrahlte Schalleistung eine Rolle. Dieser Erkenntnis folgend werden in diesem Abschnitt im Rahmen einer Einzelrechnung Tilger in das Modell eingebracht. Diese werden nach den Kriterien nach Den Hartog [12] ausgelegt. Dazu werden jeweils in den Schwingbäuchen der

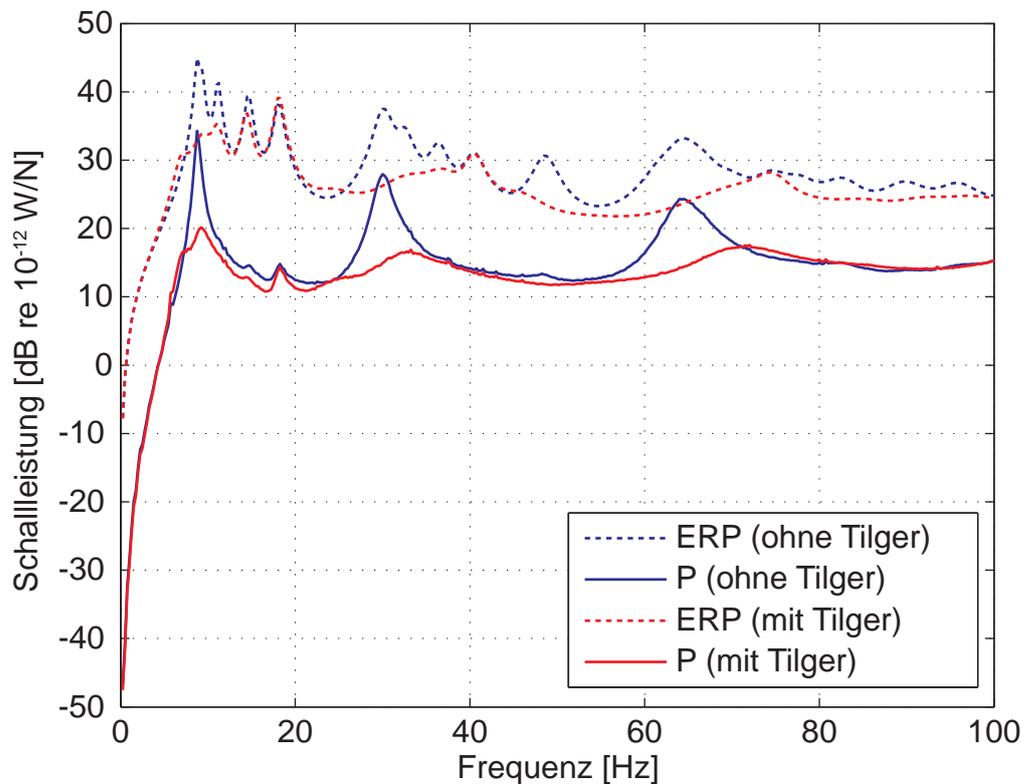
ersten drei Biegeeigenformen Tilger angeordnet. Die Berechnung erfolgt mithilfe der in Kapitel 7.3.2.3 beschriebenen stochastischen Anregung, um sämtliche Schwingmoden im untersuchten Frequenzbereich gut anregen zu können.



**Abbildung 9.4:** ca.8 Hz (Biegung)



**Abbildung 9.5:** ca.18 Hz (kurzweilig, Torsions-  
schwingungen der einzelnen  
Elemente)



**Abbildung 9.6:** Vergleich Schalleistung zu äquivalenter abgestrahlter Leistung (mit Tilger)

In Abbildung 9.6 sind die Resultate für die abgestrahlte Schalleistung ( $P$ ) mit und ohne Tilger zusammen mit der jeweils zugehörigen äquivalenten abgestrahlten Leistung ( $ERP \hat{=} \sigma = 1$ ) aufgetragen. Die Ergebnisse ohne Tilger bestätigen die oben getroffene Annahme, dass die Biegeeigenformen für die Schallabstrahlung maßgeblich sind. Während im Verlauf von  $ERP$  im Frequenzbereich oberhalb der reinen Biegeeigenfrequenzen eine Vielzahl von Resonanzspitzen auftreten (exemplarisch ist in Abbildung 9.5 die Schwingform bei ca.18 Hz abgebildet), sind in  $P$  nur die drei Resonanzen mit reiner Biegung zu erkennen. Dieses Phänomen lässt sich durch die in Kapitel 8.5 erwähnte und in Winter [60] näher beschriebene Anisotropie des Brettsper Holzdecke erklären. In Längsrichtung ist diese deutlich steifer als in Querrichtung, was in Querrichtung zu großen Biegewellenzahlen führt. Diese liegen außerhalb des für die abgestrahlte Schalleistung relevanten Wellenzahlbereiches und tragen somit nur in geringem Maße zur abgestrahlten Schalleistung bei.

Mit eingebauten Tilgern lassen sich gerade die Schwingformen mit kleinen Biegewellenzahlen gut tilgen, was zu einer deutlichen Reduzierung der abgestrahlten Schalleistung führt. Gut zu erkennen ist ebenfalls, dass einige Resonanzspitzen im Verlauf von  $ERP$  von den Tilgern nicht beeinflusst werden, was jedoch ohne Auswirkungen bleibt.

## 9.2.2 Auswertung der Parameterstudie zur Beurteilung der Parameter der Unterdecke (BSD RU+RUE Typ 165)

Bei dieser Parameterstudie erfassen die variierten Parameter aufgrund deren großer Anzahl nur einen begrenzten Parameterbereich. Eine Darstellung mithilfe von dimensionslosen Kenngrößen ist daher nicht zweckmäßig. Die Beurteilung der einzelnen Parameter erfolgt daher durch den Vergleich ausgewählter Parameterkombinationen. Es werden Simulationen mit und ohne Estrich durchgeführt, wobei die Abmessungen des Estrich gleich bleiben. Die Resonanzfrequenz des Estrichs lässt sich vereinfacht als Einmassenschwinger berechnen zu:

$$f_{ff} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s_{ins}}{\rho_{ff} \cdot d_{ff}}} = 71.2 \text{ Hz} \quad (9.1)$$

$f_{ff}$  : Resonanzfrequenz des Estrichs

$s_{ins}$  : dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmung (20 MN/m<sup>3</sup>)

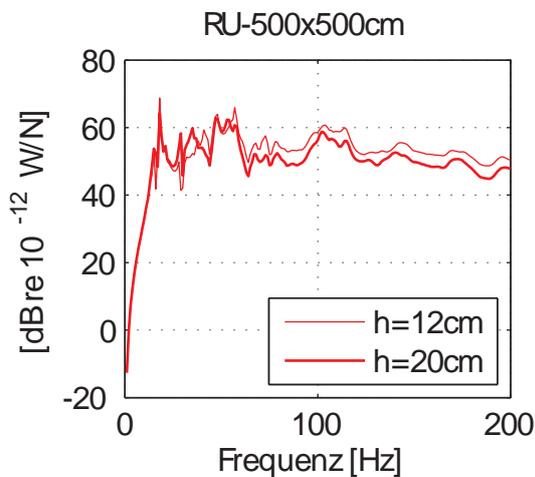
$\rho_{ff}$  : Rohdichte des Fließestrichs (2000 kg/m<sup>3</sup>)

$d_{ff}$  : Stärke des Fließestrichs (0.05 m)

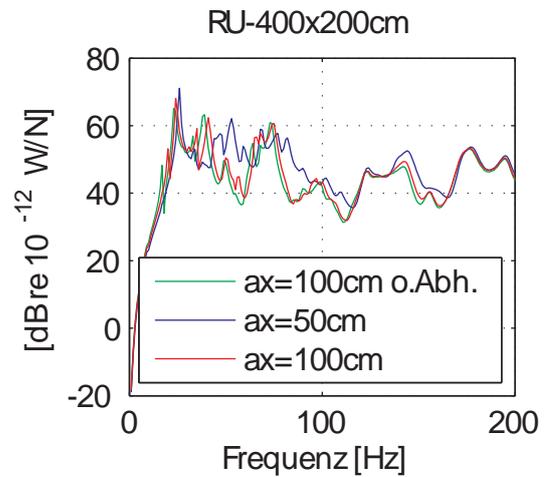
### 9.2.2.1 Abhängehöhe

Der Einfluss unterschiedlicher Abhängehöhen kann anhand der in Anhang A.2.2 mit und ohne Estrich, für unterschiedliche Längen, bzw. Längenverhältnisse und Absorptionsgrade bei einem Abhängerraster von 100 cm abgelesen werden. In Abbildung 9.7 ist eines dieser Diagramme exemplarisch für die Parameterkombination ohne Estrich und den Abmessungen 500 × 500 cm dargestellt.

Darin ist über den gesamten betrachteten Frequenzbereich ein um etwa 3 dB niedrigerer Schallleistungspegel bei Verwendung einer Abhängehöhe von 20 cm gegenüber der kleineren Abhängehöhe von 12 cm zu beobachten.



**Abbildung 9.7:** abgestrahlte Schalleistung aus Simulation mit unterschiedlicher Abhängehöhe  $h$

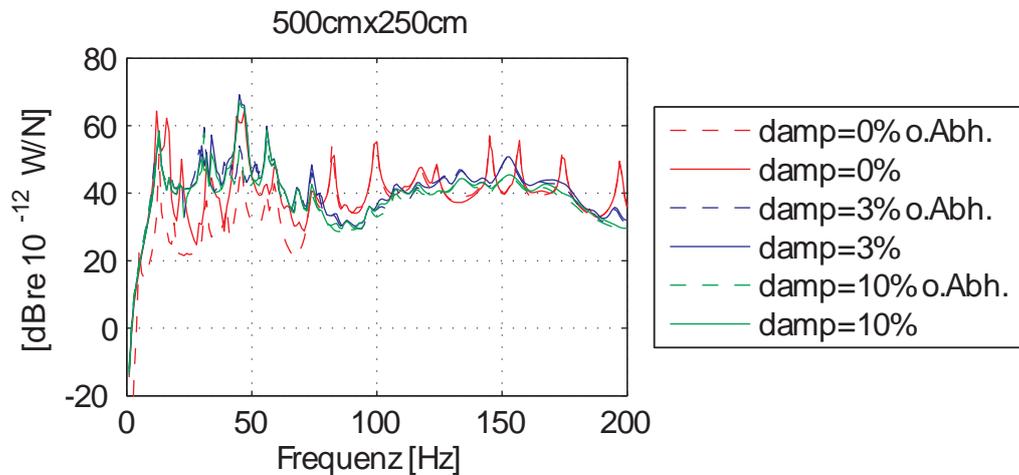


**Abbildung 9.8:** abgestrahlte Schalleistung aus Simulation mit unterschiedlicher Rasterweite  $ax$ , mit und ohne Abhänger

### 9.2.2.2 Rasterweite mit und ohne Abhänger

Eine Auswertung bezüglich der Rasterweite mit und ohne Abhänger kann anhand der Diagrammen in Anhang A.2.3 durchgeführt werden. Wieder werden unterschiedliche Längen, bzw. Längenverhältnisse und Absorptionsgrade mit und ohne Estrich dargestellt, zusätzlich wird hierbei noch die unterschiedliche Abhängehöhe berücksichtigt. Analog zu oben wird in Abbildung 9.8 eine exemplarische Darstellung gezeigt, wiederum ohne Estrich, jedoch mit den Abmessungen  $400 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ .

Im Gegensatz zur Abhängehöhe kann im Falle der Rasterweite keine klare Aussage getroffen werden. In den meisten Diagrammen ist jedoch ein leicht höherer Schalleistungspegel für eine Rasterweite von  $50 \text{ cm}$  zwischen  $50 \text{ Hz}$  und  $100 \text{ Hz}$  zu erkennen, im höheren Frequenzbereich gleichen sich die Kurven an. Bemerkenswert ist, dass eine Konfiguration ohne Abhänger zwar einen niedrigeren Pegel aufweist, der Unterschied zu den Ergebnissen mit Abhänger ist jedoch bis auf wenige Parameterkombinationen zu vernachlässigen.



**Abbildung 9.9:** abgestrahlte Schalleistung aus Simulation mit unterschiedlichen Absorptionsgraden *damp*, mit und ohne Abhänger

### 9.2.2.3 Absorptionsgrad der angrenzenden Struktur

Während die Luftschicht oben und unten durch Rohdecke und Unterdeckenbeplankung begrenzt ist, werden die übrigen Ränder durch die Betonwände des Prüfstandes, bzw. Gebäudes bestimmt. Schallwellen in der Luft werden daran in Abhängigkeit des angesetzten Absorptionsgrades reflektiert. In den Diagrammen in Anhang A.2.4 werden Parameterkombinationen mit 3% bzw. 10 % Absorption und zum Vergleich mit vollständiger Reflexion dargestellt. Abbildung 9.9 stellt exemplarisch die Simulationen mit den Abmessungen 500 cm × 250 cm, einer Abhängehöhe von 12 cm und einem Raster von 100 cm dar. Zusätzlich sind jeweils die Ergebnisse ohne Abhänger aufgetragen.

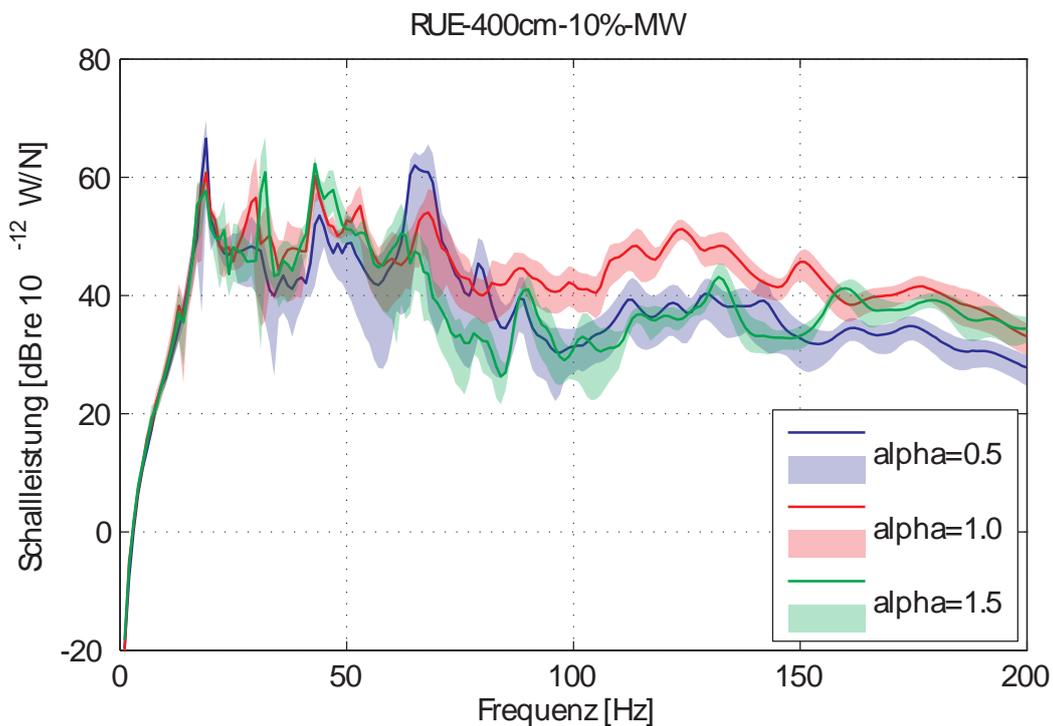
Es lassen sich bei vollständiger Reflexion die Resonanzen innerhalb der Luftschicht gut erkennen. Diese treten oberhalb von etwa 50 Hz auf und werden bei Absorption gedämpft. Obwohl die Spitzen stärker abgeflacht sind, unterscheiden sich die Pegel für beide Absorptionsgrade nur in geringem Maße. Wie schon in Abschnitt 9.2.2.2 angesprochen, bestehen kaum Unterschiede für die Simulation mit und ohne Abhänger.

### 9.2.2.4 Abmessungen

Für die Untersuchung der unterschiedlichen Längenverhältnisse werden die Ergebnisse in den Diagrammen in Anhang A.2.5 nach Längen und Ausbauzustand, geordnet für unterschiedliche

Absorptionsgrade zusammengefasst. Da die Darstellung der Einzelmessungen sehr unübersichtlich ist, werden parallel die Mittelwerte und der jeweilige Wertebereich der Verläufe in gesonderten Diagrammen dargestellt. Ein Beispiel mit Estrich für eine Länge von 400 cm und einen Absorptionsgrad von 10 % zeigt Abbildung 9.10.

Unterhalb von 50 Hz zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Verläufe. Etwa oberhalb der Estrichresonanz liegen die Pegel bei einem Längenverhältnis von  $\alpha = 1.0$  teilweise deutlich über denen von  $\alpha = 0.5$  und  $\alpha = 1.5$ , während diese beiden Verläufe annähernd übereinstimmen.

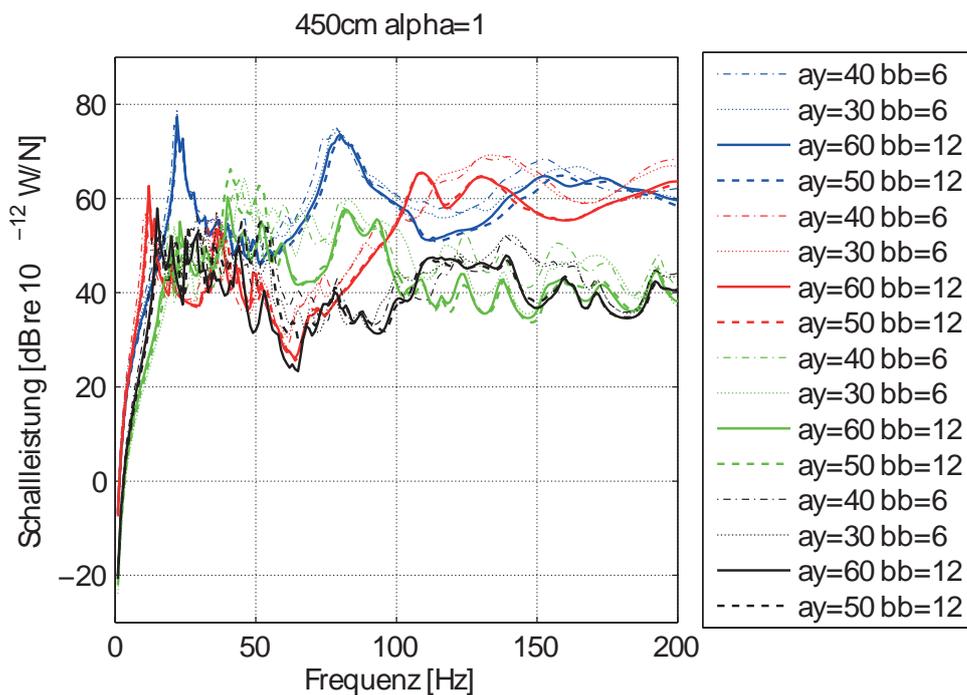


**Abbildung 9.10:** Mittelwert der abgestrahlten Schalleistung aus Simulationen für unterschiedliche Längenverhältnisse  $\alpha$

Des Weiteren sind in den Diagrammen in Anhang A.2.6 die Mittelwerte für die Längen 400 und 500 cm nach Längenverhältnis geordnet gegenübergestellt. Obwohl sich die ersten Eigenfrequenzen der Rohdecken unterscheiden, sind weder mit noch ohne Estrich deutliche Unterschiede feststellbar. Auch hier ist die Normierung auf die erste Eigenfrequenz nicht sinnvoll, da vor allem die Estrichresonanz und die Schwingmoden des Luftvolumens maßgeblich sind. Die in den Diagrammen in Anhang A.2.7 aufgezeigte Unterscheidung zwischen den Simulationen mit und ohne Estrich sei hier nur kurz erwähnt, da im nächsten Abschnitt alle Ausbaustände verglichen werden.

### 9.2.3 Auswertung der Parameterstudie (PS-GUI HBD) zur Beurteilung der Parameter der Holzbalkendecke und der Ausbauzustände

Für die Untersuchung der Parameter der Holzbalkendecke wird keine spezielle Parameterstudie durchgeführt, da die Simulationsergebnisse der PS-GUI dafür ausreichen. Gleichzeitig lassen sich anhand dieser Daten auch die Einflüsse der unterschiedlichen Ausbauzustände ablesen. Die Daten der Parameterkombinationen, für die bei allen Ausbauzuständen Simulationsergebnisse vorliegen, sind in Anhang A.2.8 dargestellt. Dort werden zunächst aus Gründen der Übersichtlichkeit die Simulationsergebnisse für jeden Ausbauzustand getrennt aufgeführt und in den darauf folgenden Abbildungen überlagert, wobei die Ausbauzustände farblich unterschieden werden. Balkenabstände sind durch unterschiedliche Linienarten, Balkendicken durch unterschiedliche Strichstärken gekennzeichnet. Weiterhin werden unterschiedliche Längen und Längenverhältnissen in separaten Diagrammen dargestellt. Abbildung 9.11 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für Abmessungen von 450 cm × 450 cm.



**Abbildung 9.11:** Vergleich von Ausbauzuständen (R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz), Balkenabständen *ay* in cm und Balkenbreiten *bb* in cm

### 9.2.3.1 Balkenabstand

Beim Vergleich der Diagramme fällt auf, dass der Abstand der Balken bei allen Simulationen einen geringen Einfluss auf die ermittelten Schalleistungspegel hat. Lediglich bei einigen Abmessungen treten bei Parameterkombinationen mit Unterdecke im Frequenzbereich unter 100 Hz größere Abweichungen der Verläufe auf, wobei kleiner Abstände tendenziell zu größeren Schalleistungen in diesem Bereich führen. Da der Abstand der Abhänger im Falle der Holzbalkendecke auf den doppelten Balkenabstand festgelegt ist, lässt sich dies analog zu 9.2.2.2 durch das engere Abhängerraster erklären.

### 9.2.3.2 Balkenbreite

Für unterschiedliche Balkenbreiten fallen die Unterschiede in den Verläufen der Schalleistungspegel ebenfalls nur gering aus, wobei kleinere Balkenbreiten tendenziell höhere Pegel im Frequenzbereich über 50 Hz bewirken.

### 9.2.3.3 Ausbauzustände

Die größten Unterschiede sind beim Vergleich der unterschiedlichen Ausbauzustände zu erkennen. Während die Simulation der reinen Rohdecke einzelne ausgeprägte Spitzen im Bereich der reinen Biegeeigenfrequenzen aufweisen, sind die Verläufe der übrigen Ausbauzustände deutlich unruhiger. Vor allem die Amplitude im Bereich erste Eigenfrequenz der Rohdecke wird deutlich reduziert, ansonsten sind die Pegel aller Ausbauzustände bis etwa 50 Hz etwa auf dem selbem Niveau, mit Estrich sind sie etwas geringer. Im Frequenzbereich oberhalb dieser Grenze treten teilweise erhebliche Unterschiede im Schalleistungspegel auf. Die Simulationen mit Unterdecke liefern hier zwar kleinere Amplituden als die reine Rohdecke, Parameterkombinationen mit Estrich liegen jedoch noch einmal deutlich darunter. Bis etwa 100 Hz ändert sich dies in der Art, dass die Decke mit Estrich aber ohne Unterdecke nun etwas höhere Pegel aufweist, die teilweise im Bereich der dritten Biegeeigenfrequenz die Werte der reinen Rohdecke übertreffen. Generell liegt der Schalleistungspegel der Rohdecke mit Estrich ab diesem Frequenzbereich etwas unterhalb der reinen Rohdecke. Beide Verläufe liegen wiederum deutlich teilweise bis zu 20 dB über dem Pegel der jeweiligen Ausbauzustände mit Unterdecke, da die Schalleistungspegel durch die Unterdecke im betrachteten Frequenzbereich kontinuierlich reduziert werden und niedrig bleiben.

## 9.2.4 Zusammenfassung der Einflüsse der Parameter

Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen aus Abschnitt 9.2 in Tabelle 9.9 zusammengefasst. Den Einfluss der jeweiligen Parameter auf die abgestrahlte Schalleistung kann dort für unterschiedliche Frequenzbereiche abgelesen werden (leichte Erhöhung: “-“; keine Änderung: “o“; leichte und deutliche Verringerung: “+“ und “++“; nur mit Unterdecke: “(U)“)

**Tabelle 9.9:** Auswirkung der Änderung der Parameter auf die abgestrahlte Schalleistung

| Parameter           | Aussage                   | Frequenzbereich [Hz] |          |           |
|---------------------|---------------------------|----------------------|----------|-----------|
|                     |                           | 0 – 50               | 50 – 100 | 100 – 200 |
| BSD Typ             | je größer der Querschnitt | o                    | +        | +         |
| BSD Plattenstreifen | je mehr                   | o                    | o        | o         |
| HBD Balkenbreite    | je breiter                | o                    | +        | +         |
| HBD Balkenabstand   | je größer                 | +(U)                 | +(U)     | o         |
| Abhängehöhe         | je größer                 | o                    | +        | +         |
| Abhängeraster       | je größer                 | +                    | +        | o         |
| Abhänger            | mit gegenüber ohne        | o                    | o        | o         |
| Absorptionsgrad     | je größer                 | o                    | +        | +         |
| Längenverhältnis    | wenn quadratisch          | o                    | -        | -         |
| Estrich             | mit gegenüber ohne        | +                    | ++       | +         |
| Unterdecke          | mit gegenüber ohne        | +                    | +        | ++        |

## 9.3 Grafische Benutzeroberfläche

Für Brettsperrholzdecken und Holzbalkendecke liegen Simulationsergebnisse für die in Abschnitt 9.1.3 vorgestellten Parameterkombinationen für sämtliche Ausbaustände und Anregepositionen vor. Die Daten liegen als Transferfunktionen in Form von Schmalbandspektren vor und können daher mit einer beliebigen Lastfunktion überlagert werden. Zu Vereinfachung des Zugriffs auf diese Daten und deren Weiterverarbeitung steht eine MATLAB<sup>®</sup>-basierte grafische Nutzeroberfläche zur Verfügung, mit deren Hilfe Schalleistungspegel für beliebige Belastungen in der in der Praxis üblicheren Terz-Darstellung berechnet werden können. Im Folgenden wird dieses Programm und dessen Anwendung erläutert.

### 9.3.1 Beschreibung der Oberfläche

Die Benutzeroberfläche (s. Abb. 9.12) ist in sechs Felder untergliedert. In oberen Bereich befinden sich (von recht nach links) die Felder für die Eingabe der Deckenparameter, ein Feld in dem die Anregungsart eingelesen werden kann und eine Grafik, aus der die Position der jeweiligen berechneten Anregepositionen abgelesen werden kann. Im unteren Bereich werden Diagramme für die Transferfunktionen von Schalleistungspegel zugehörigem effektivem Leistungspegel und Abstrahlmaß, für die ausgewählte Lastfunktion und das resultierende Terzspektrum des berechneten Schalleistungspegels angezeigt.

### 9.3.2 Ablauf der Eingabe

Für eine erfolgreiche Anwendung muss der folgende Ablauf eingehalten werden:

1. Auswahl des Deckensystems aus dem Ausklappmenü
2. Auswahl des Ausbauzustandes durch Markieren von Estrich und/oder Unterdecke
3. Anregeposition auswählen

Ab hier werden nacheinander die weiteren geometrischen Parameter als Ausklappmenü eingeblendet. Es werden immer nur diejenigen Parameter angezeigt, die aufgrund der vorherigen Auswahl noch zur Verfügung stehen.

4. Auswahl der geometrischen Parameter je nach Deckensystem
5. "Einlesen"-Knopf drücken

Ab hier werden die Diagramme der jeweiligen Transferfunktionen angezeigt. Durch Auswahl einer anderen Messposition und nochmaliges drücken des "Einlesen"-Knopfes können die Daten der unterschiedlichen Anregepositionen verglichen werden.

6. Auswahl der Anregungsart. Wird hier "Eigene Anregung" gewählt kann eine beliebige Lastfunktion eingelesen werden.

Hier können bereits vorgegebene idealisierten Lastfunktionen für Fußgänger und Normhammerwerk ausgewählt werden. Wird "Eigene Anregung" gewählt kann eine beliebige Lastfunktion eingelesen werden.



7. “Lastfunktion“-Knopf drücken

Ab hier wird die gewählte Lastfunktion in log-dB Maßstab angezeigt.

8. “Terzspektrum“-Knopf drücken

Abschließend wird der berechnete resultierende Schalleistungspegel angezeigt.

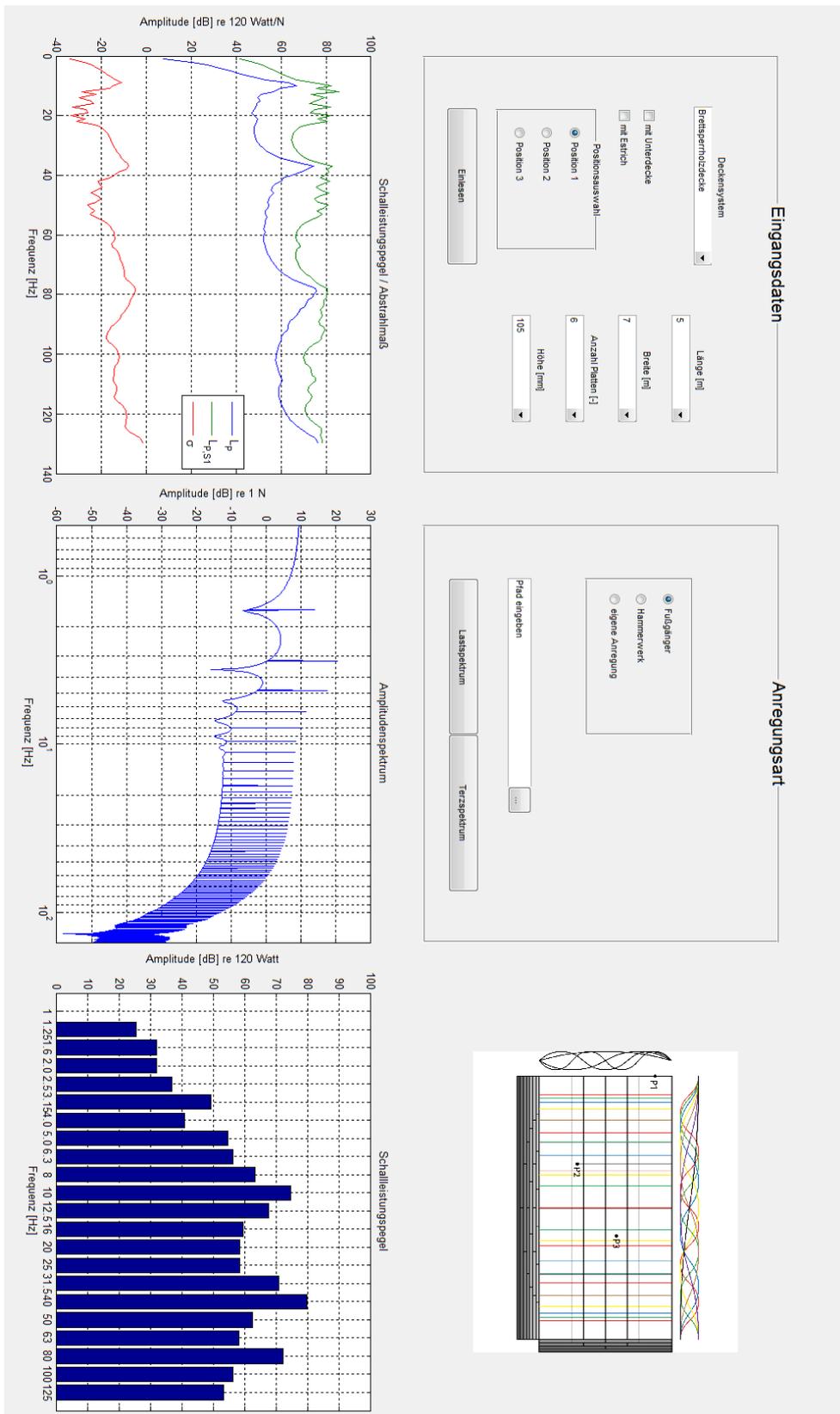
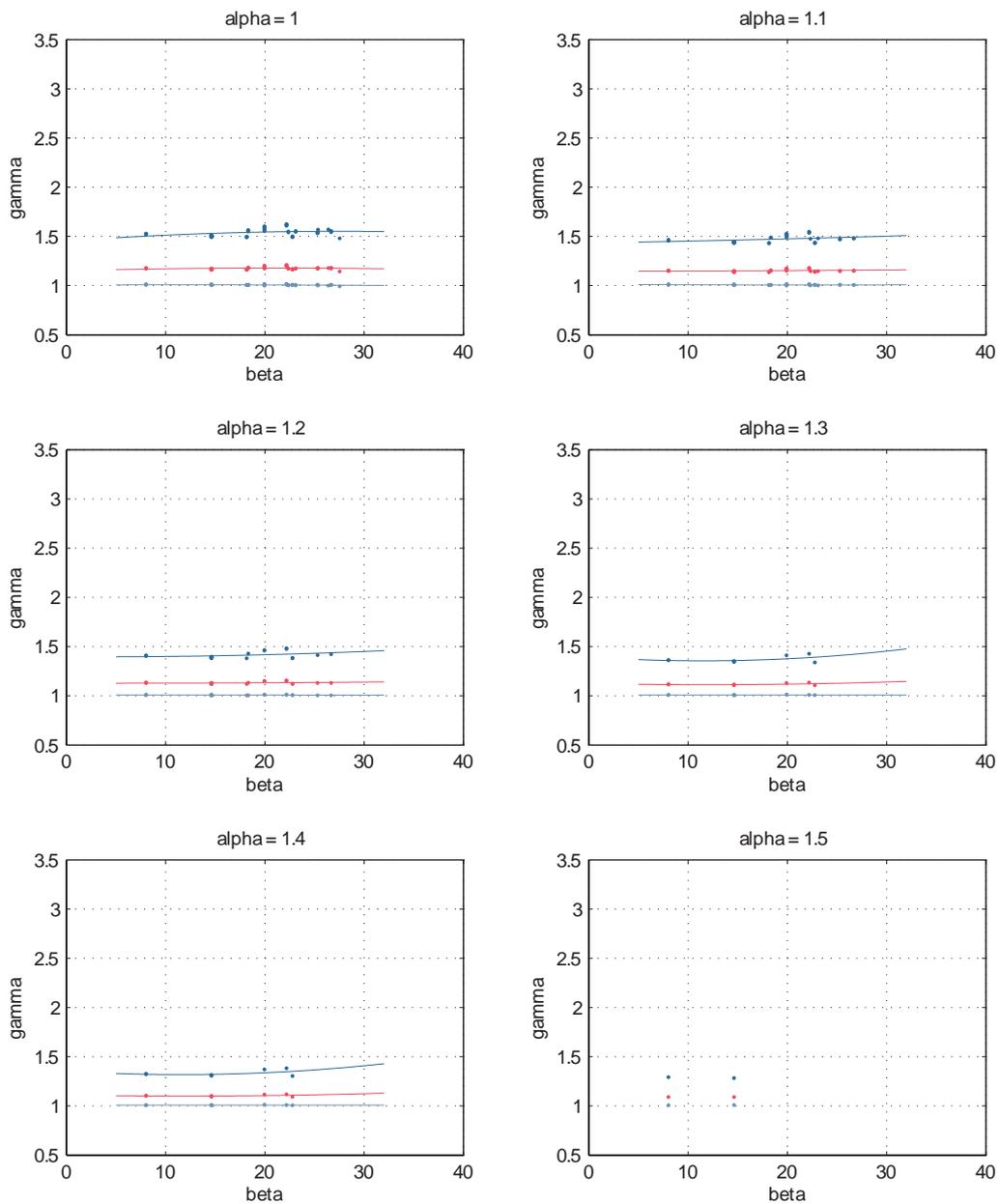


Abbildung 9.12: Grafische Benutzeroberfläche

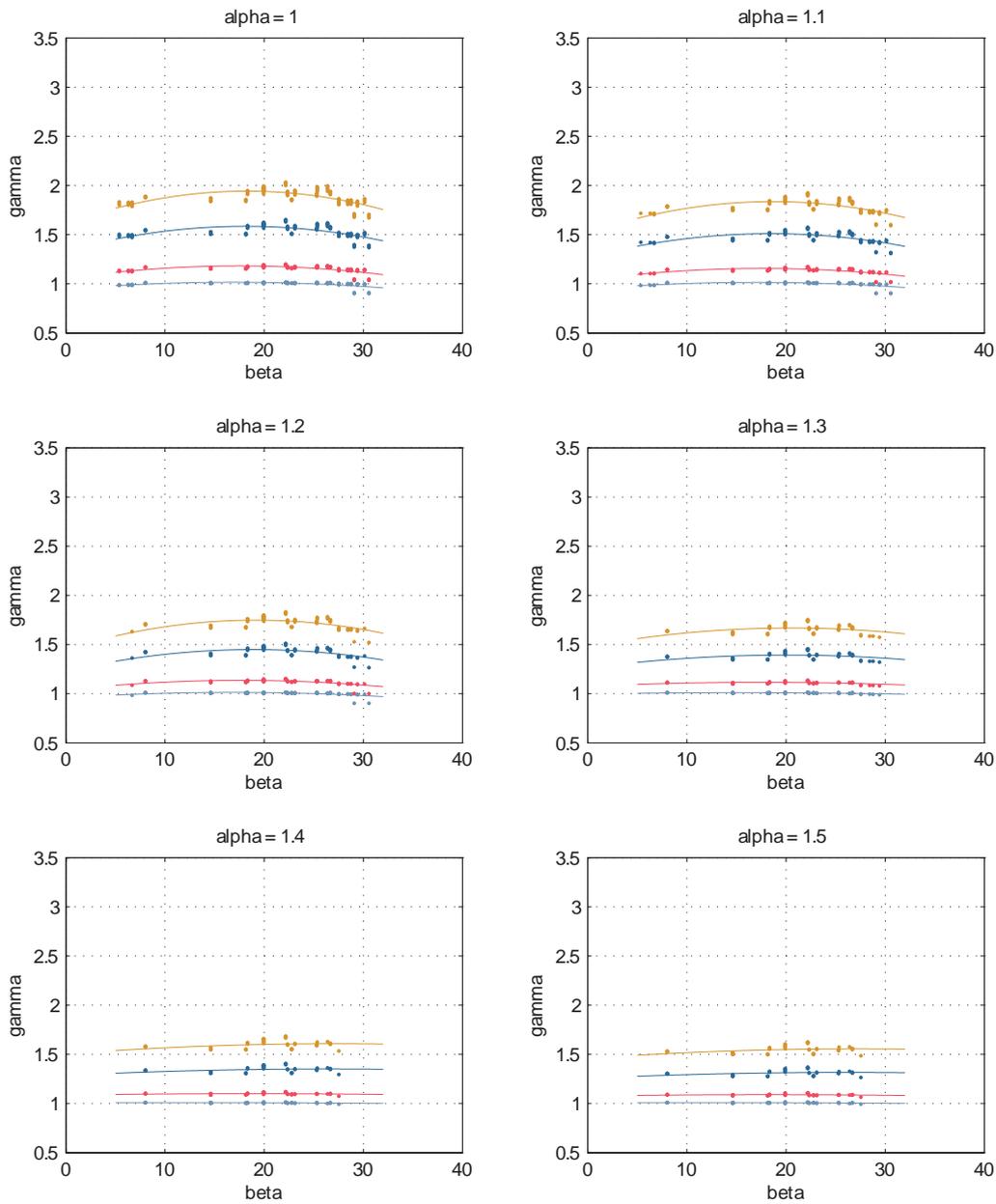


# A Simulationsergebnisse

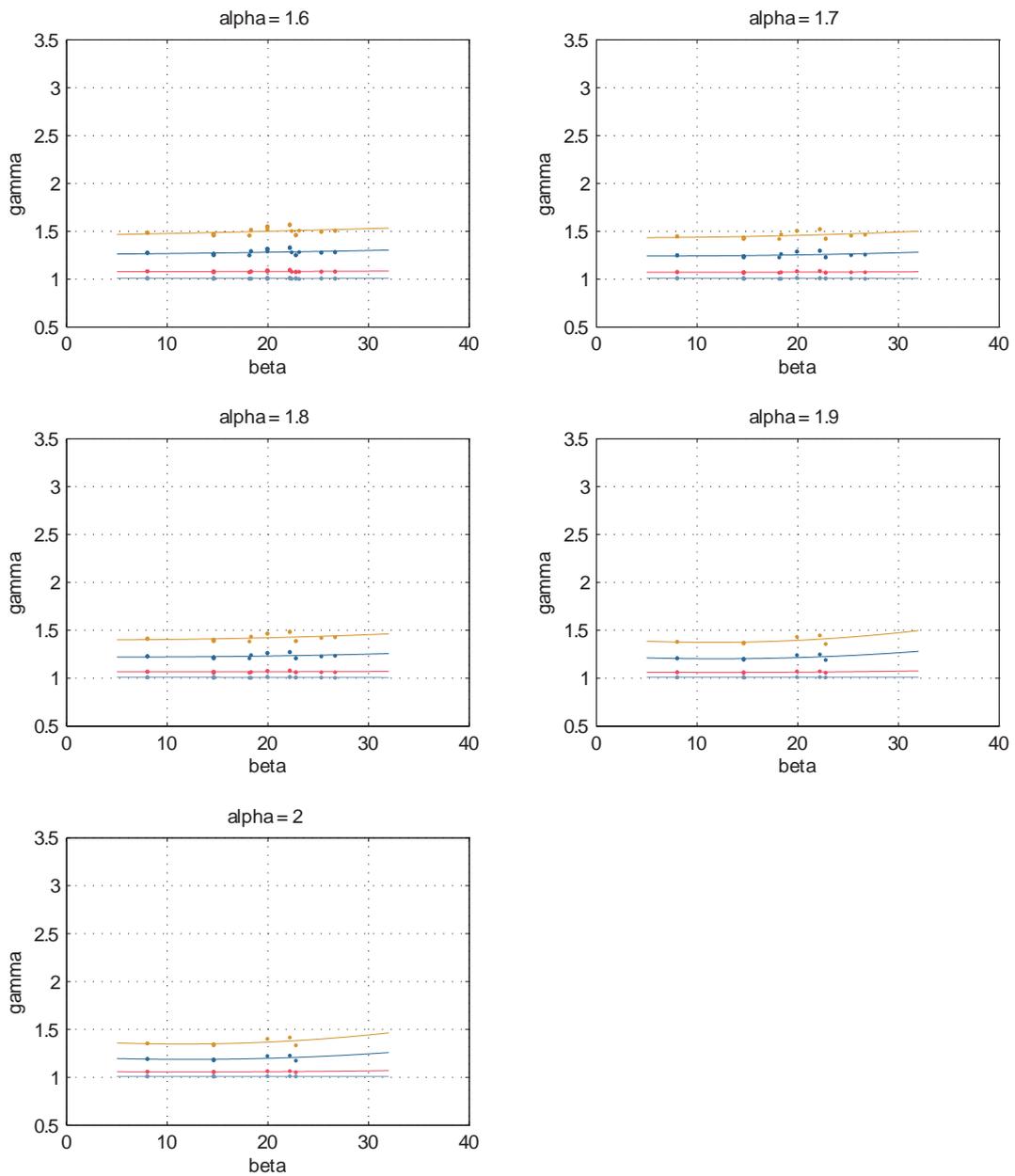
## A.1 Eigenfrequenz-Nomogramme



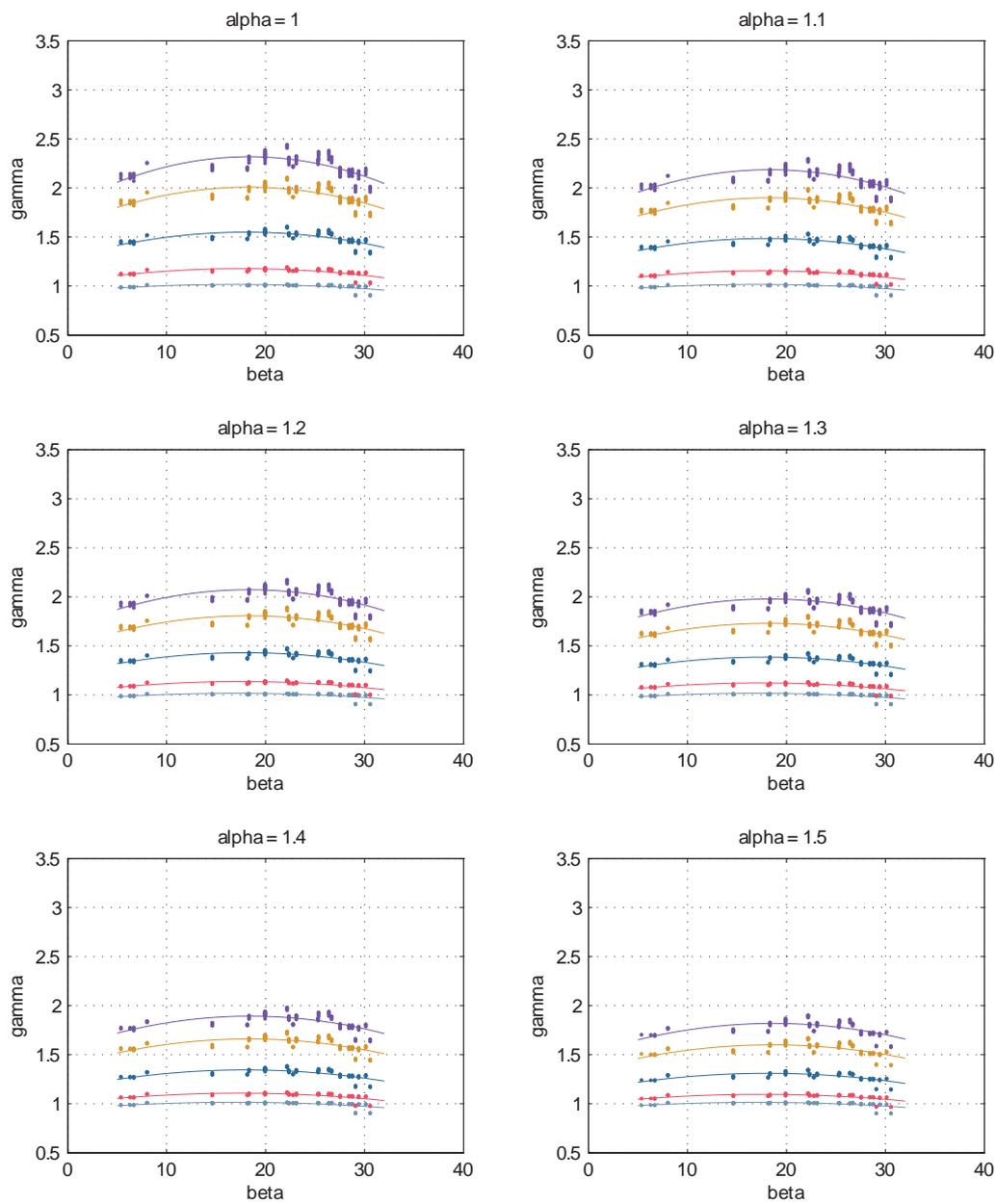
**Abbildung A.1:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
 Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 2$ ; Längenverhältnis  $1.0 \leq \alpha \leq 1.6$



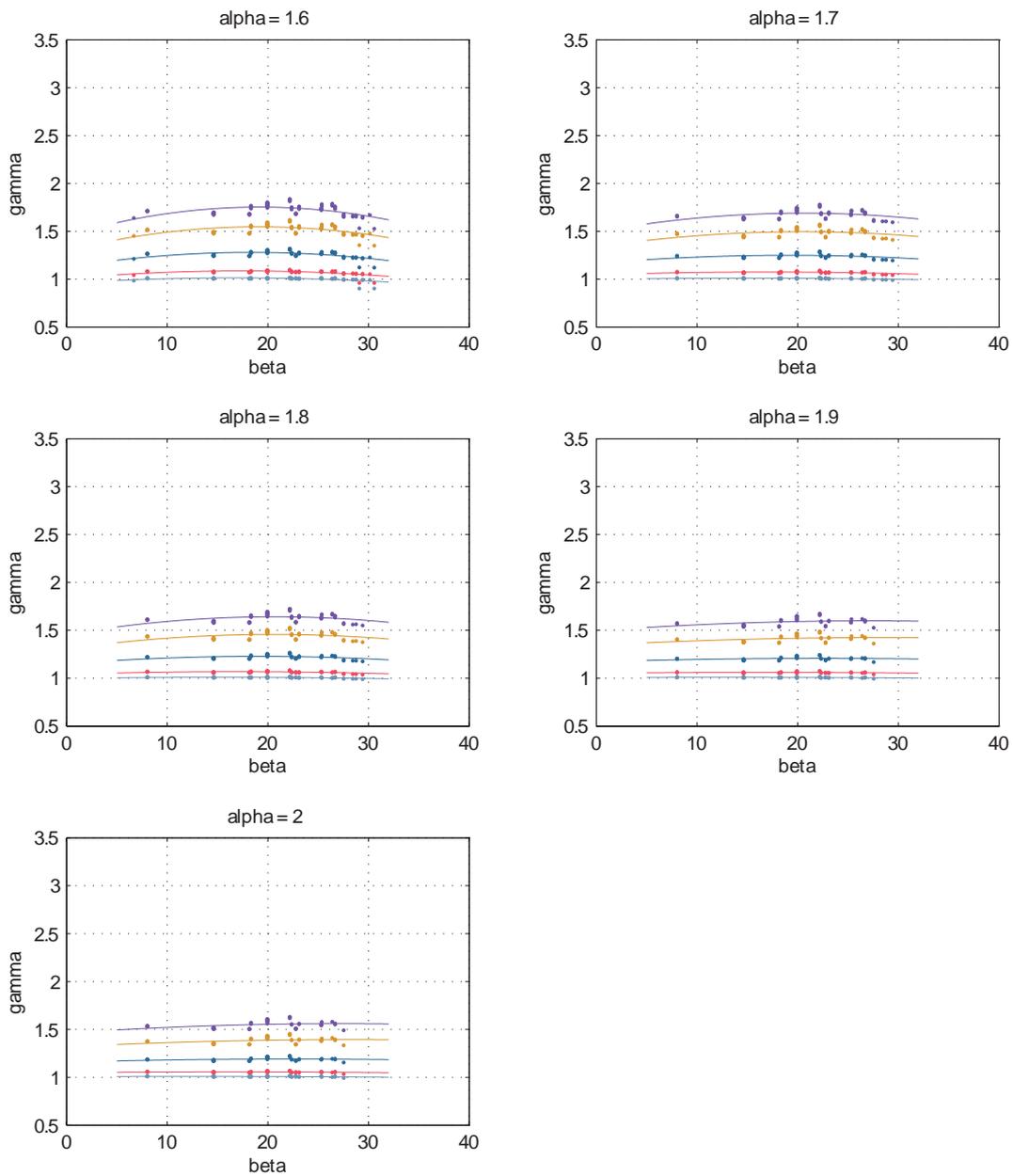
**Abbildung A.2:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 3$ ; Längenverhältnis  $1.0 \leq \alpha \leq 1.6$



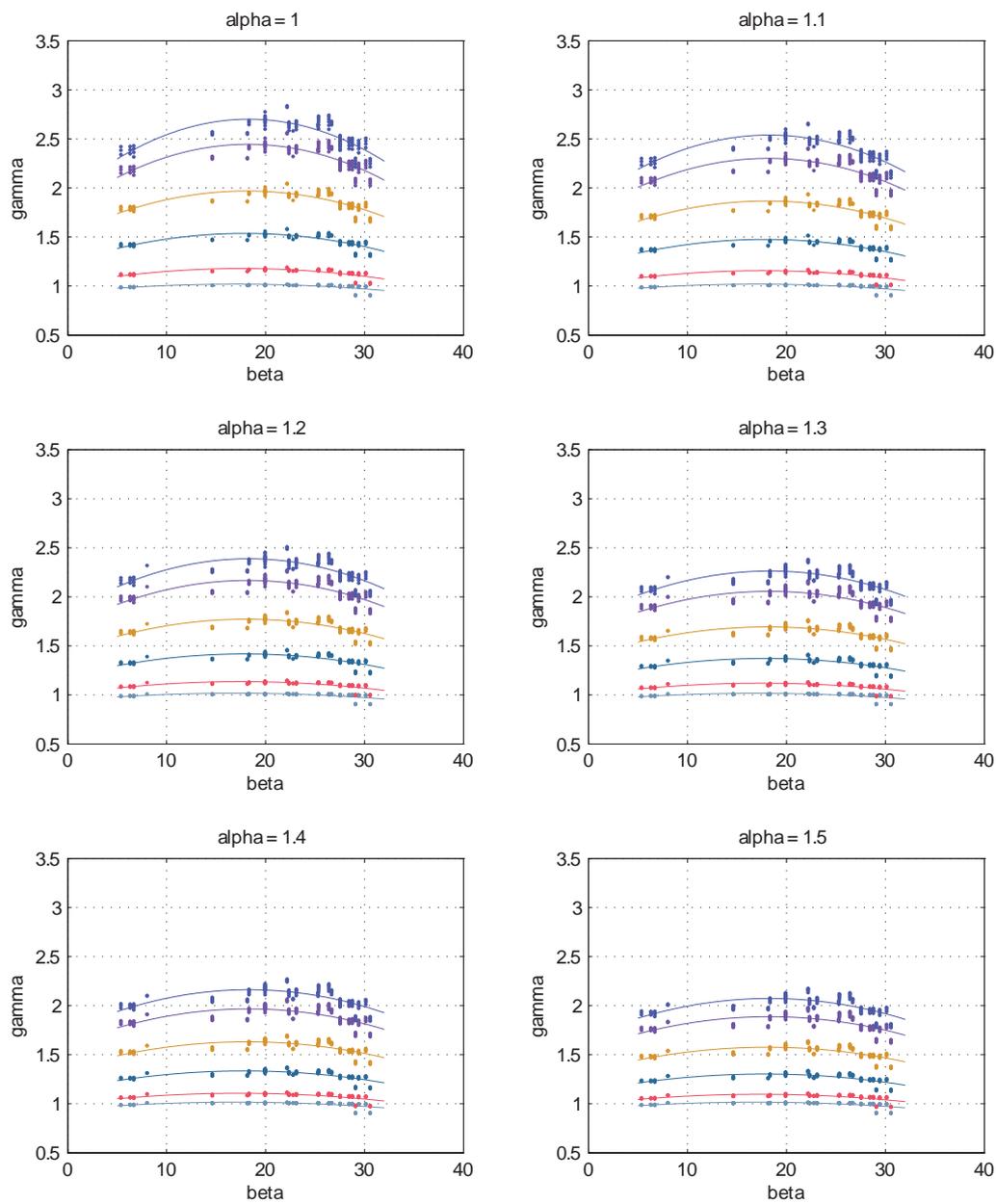
**Abbildung A.3:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
 Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 3$ ; Längenverhältnis  $1.7 \leq \alpha \leq 2.0$



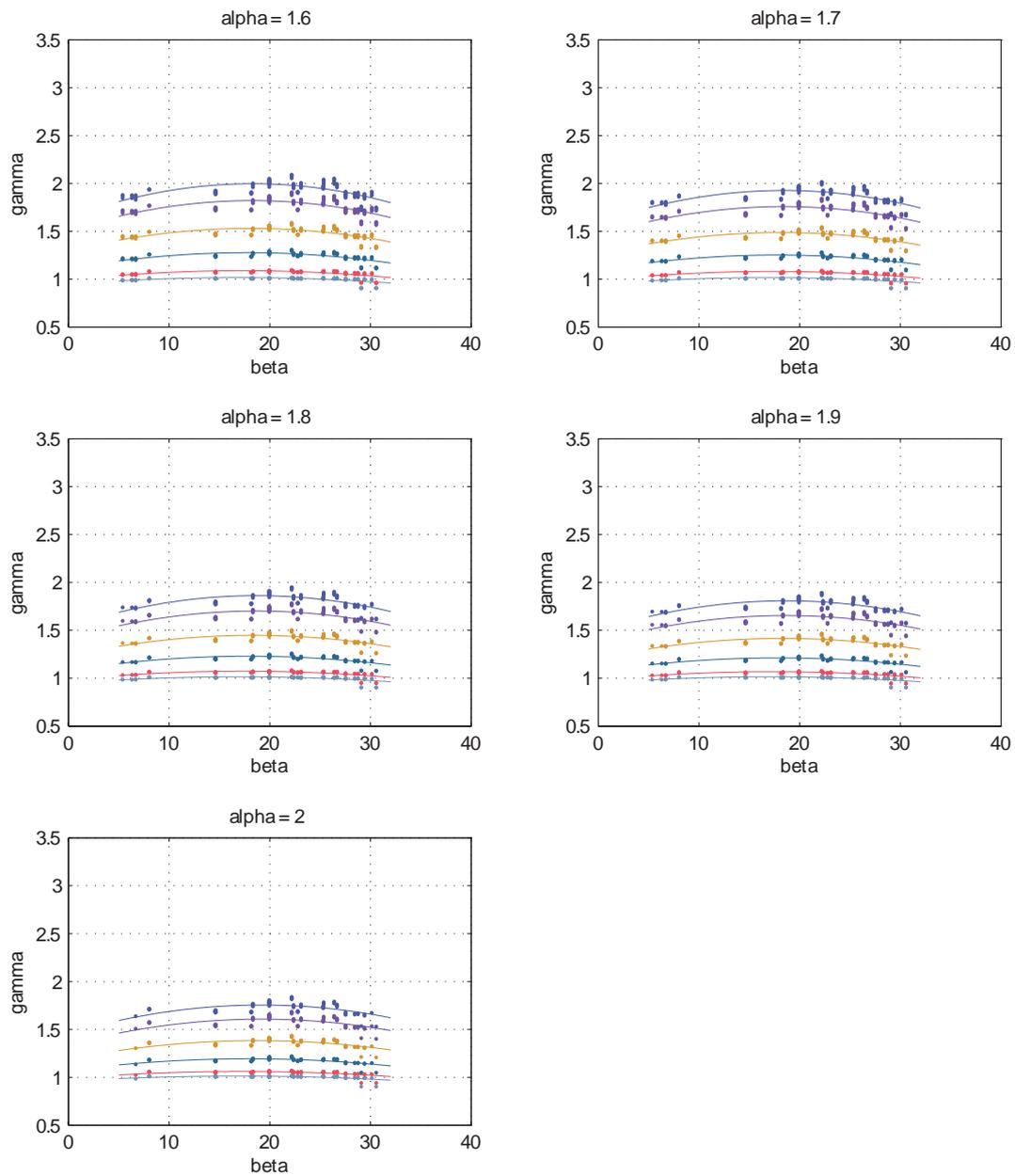
**Abbildung A.4:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 4$ ; Längenverhältnis  $1.0 \leq \alpha \leq 1.6$



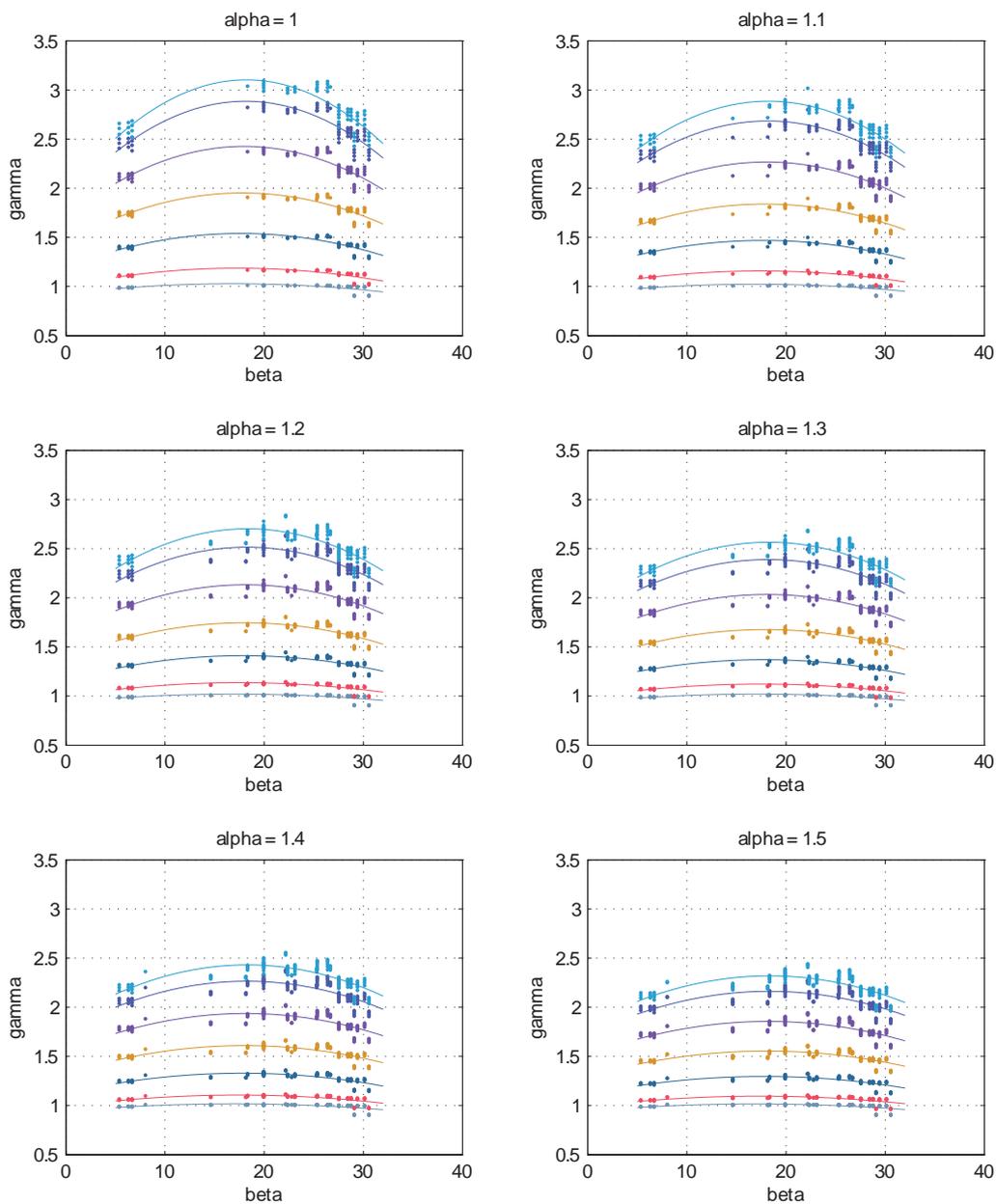
**Abbildung A.5:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
 Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 4$ ; Längenverhältnis  $1.7 \leq \alpha \leq 2.0$



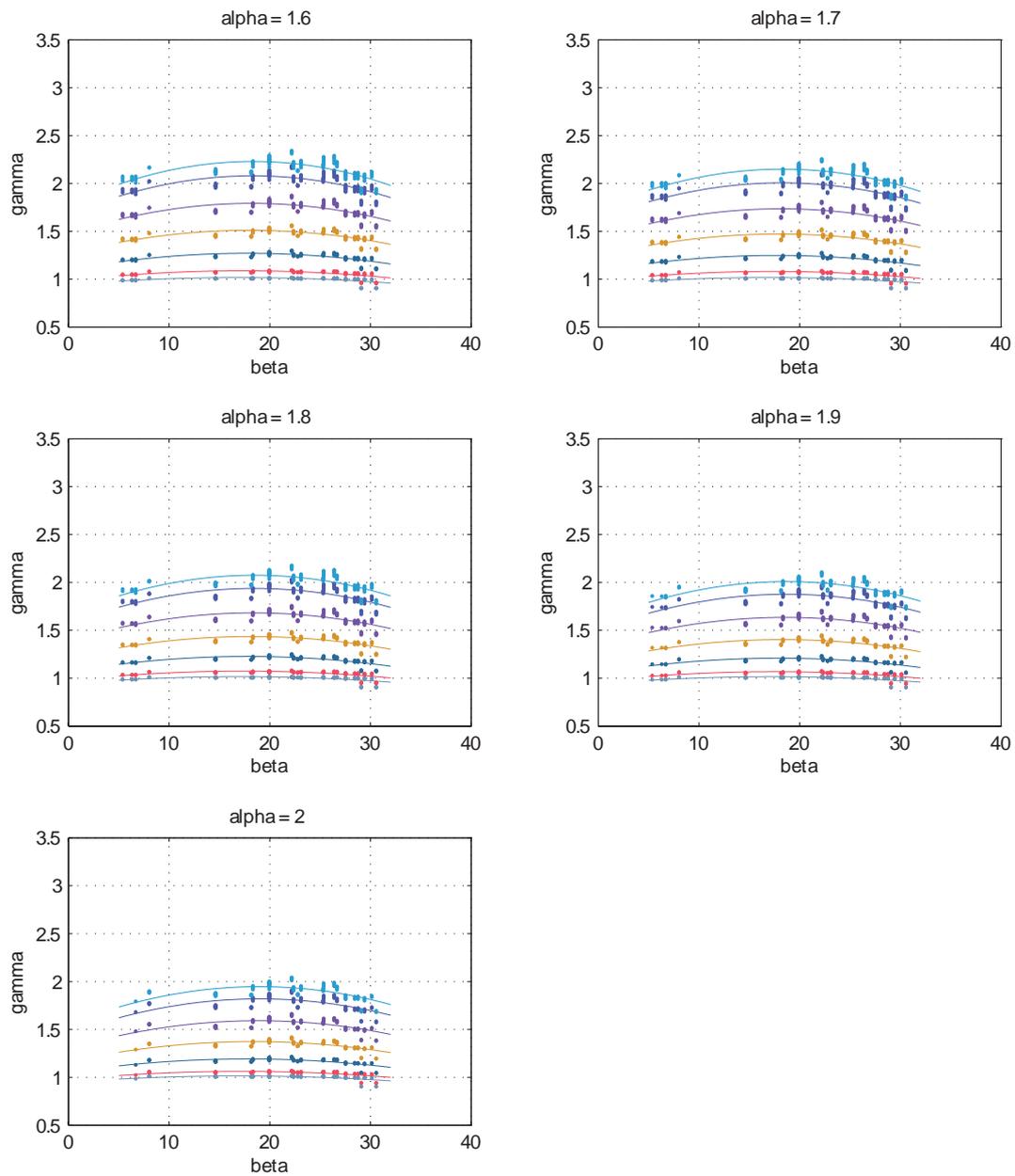
**Abbildung A.6:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 5$ ; Längenverhältnis  $1.0 \leq \alpha \leq 1.6$



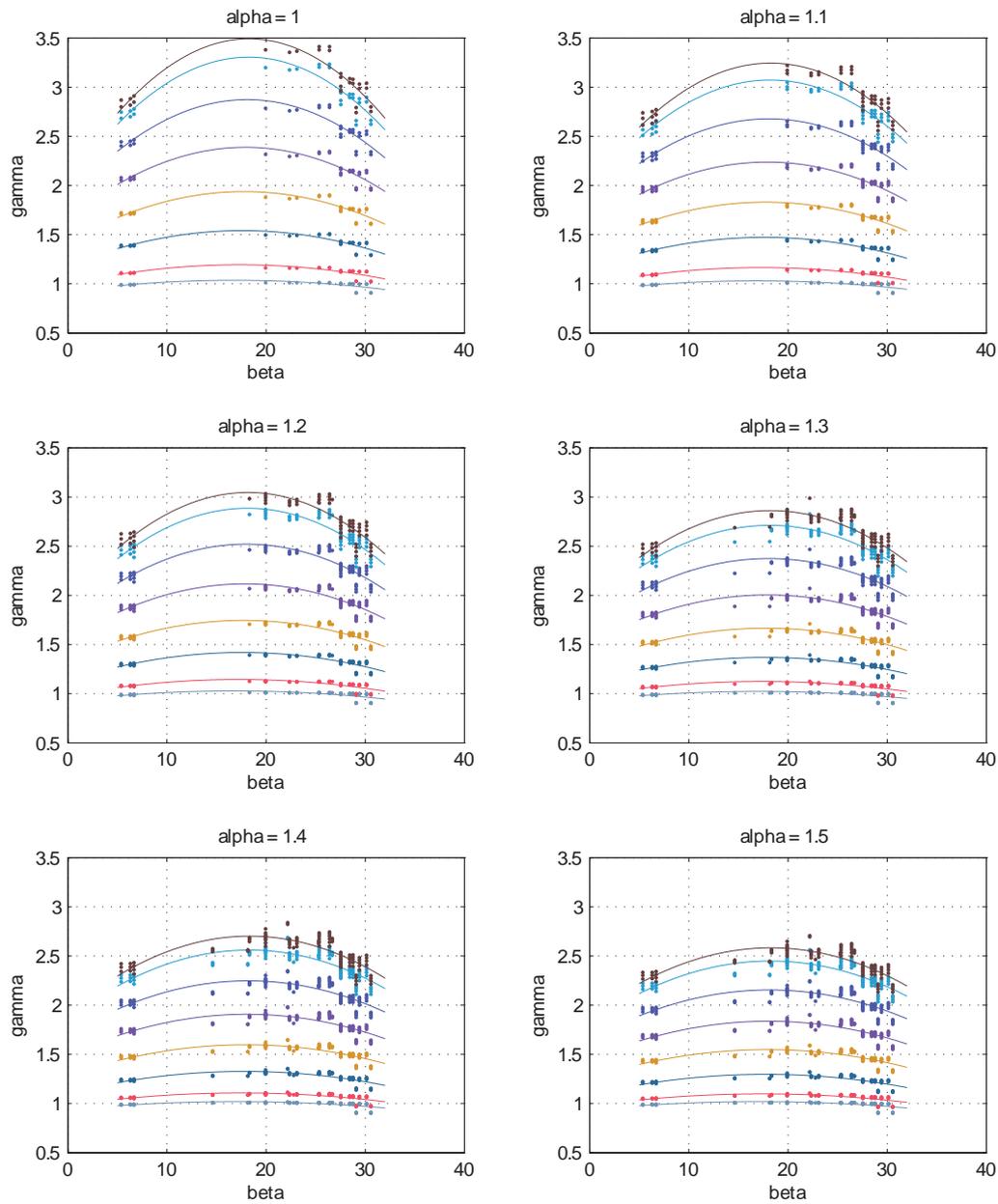
**Abbildung A.7:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
 Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 5$ ; Längenverhältnis  $1.7 \leq \alpha \leq 2.0$



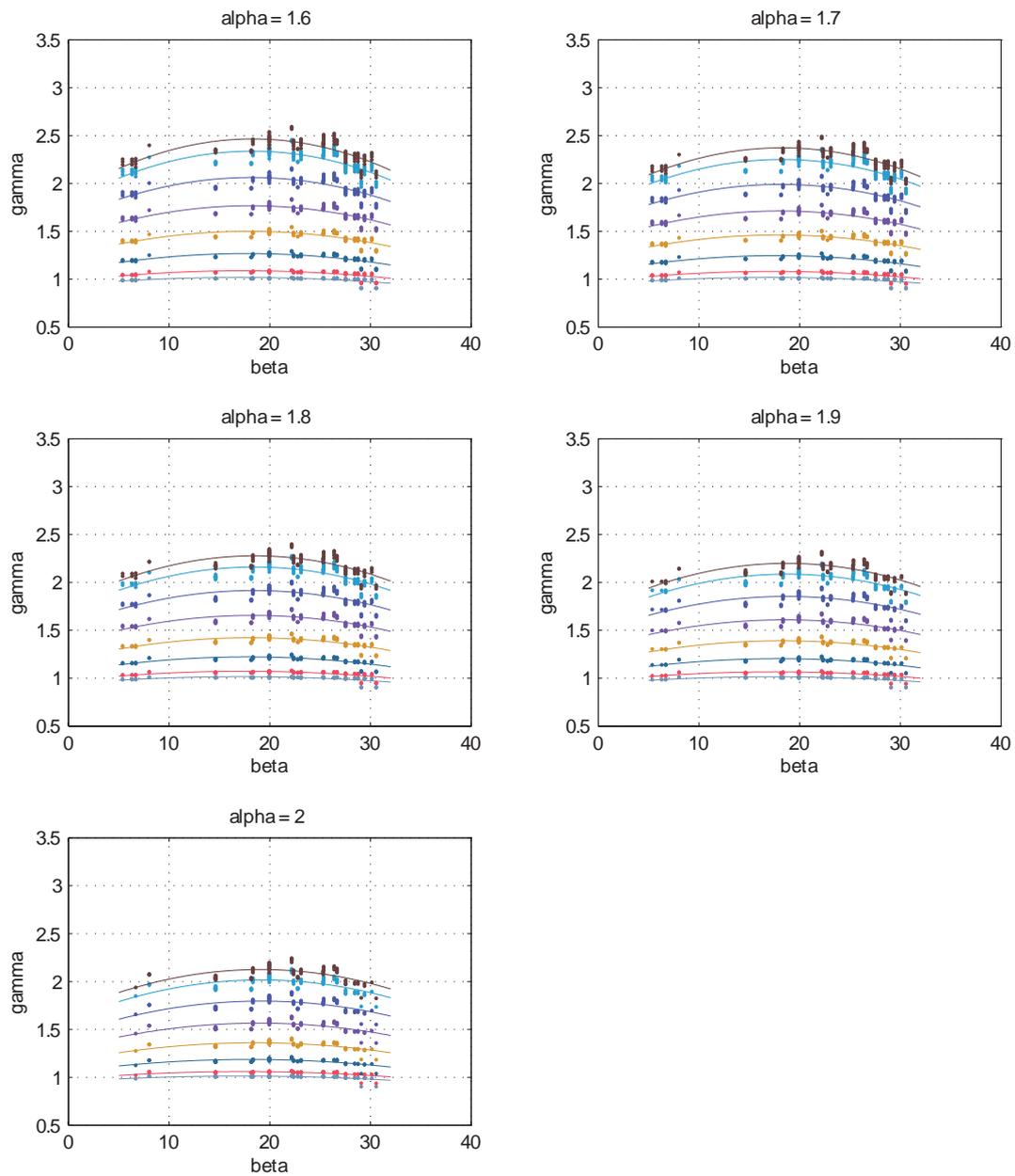
**Abbildung A.8:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 6$ ; Längenverhältnis  $1.0 \leq \alpha \leq 1.6$



**Abbildung A.9:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
 Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 6$ ; Längenverhältnis  $1.7 \leq \alpha \leq 2.0$



**Abbildung A.10:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 7$ ; Längenverhältnis  $1.0 \leq \alpha \leq 1.6$



**Abbildung A.11:** BSD-R Eigenfrequenz-Nomogramme:  
 Anzahl der Plattenstreifen  $n_p = 7$ ; Längenverhältnis  $1.7 \leq \alpha \leq 2.0$

## A.2 abgestrahlte Schalleistung

### A.2.1 Nomogramme

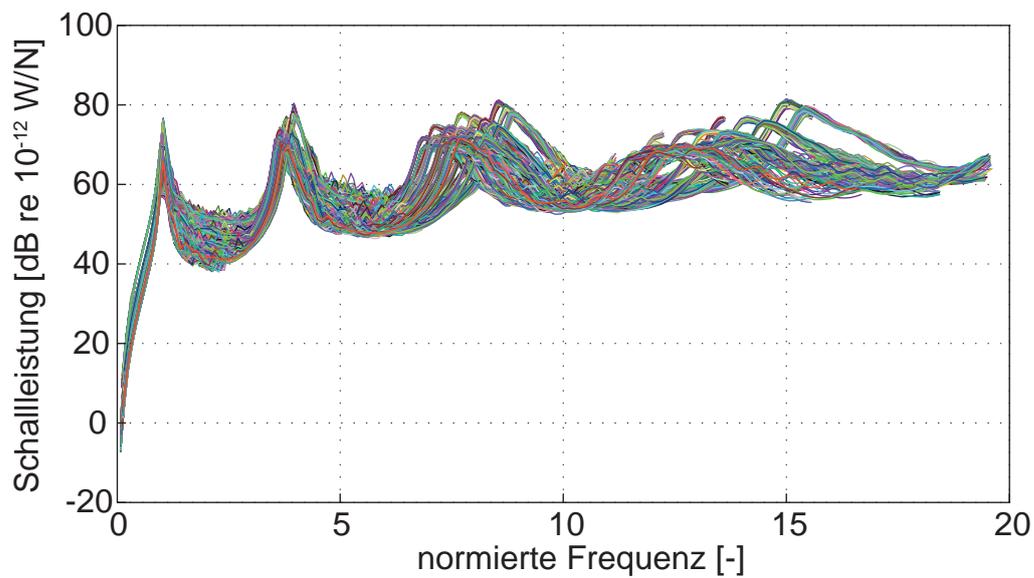


Abbildung A.12: BSD-R Schalleistungs-Nomogramm:  
alle Simulationen

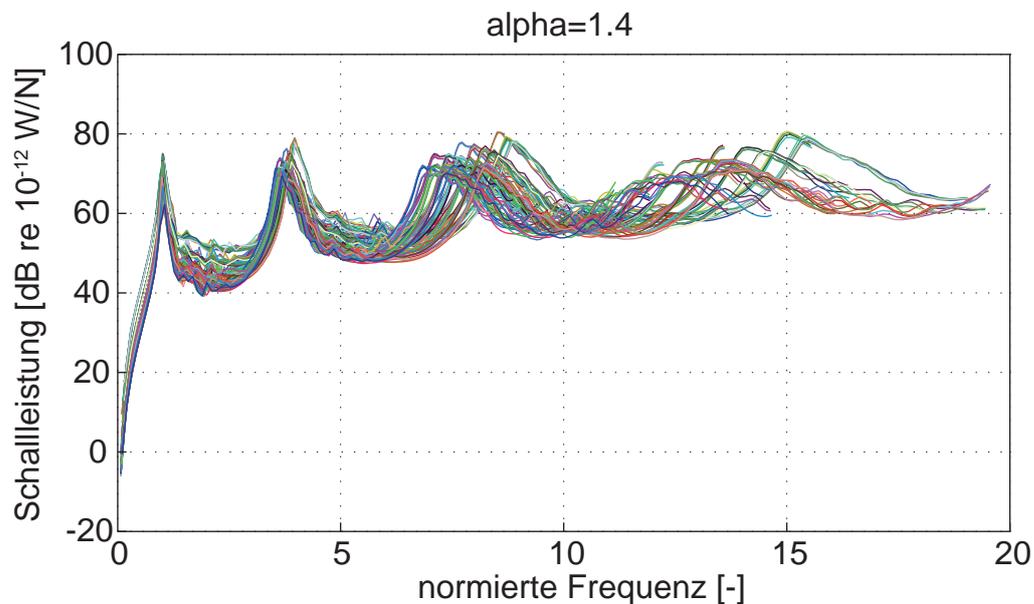
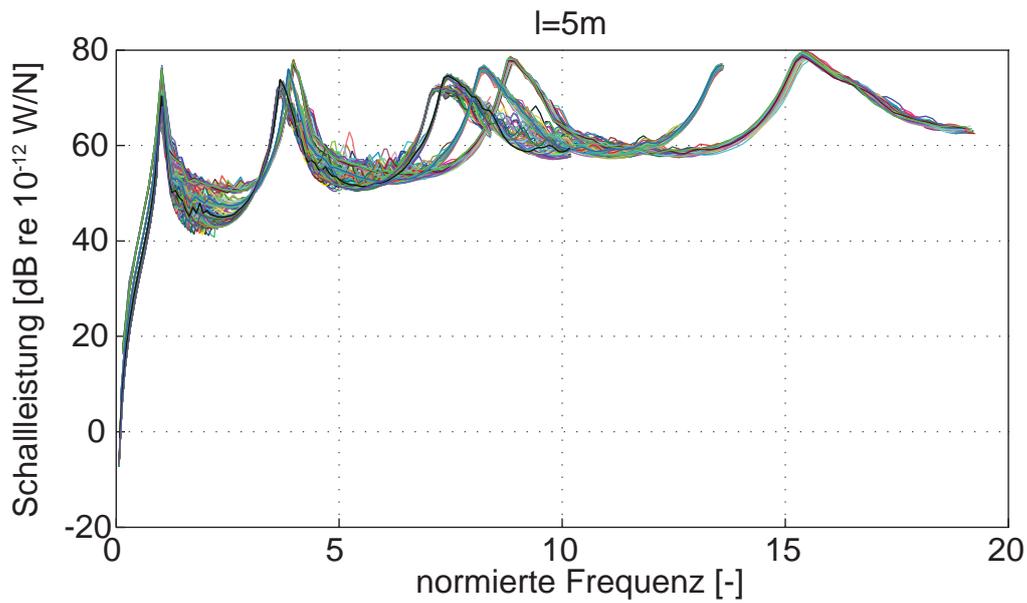
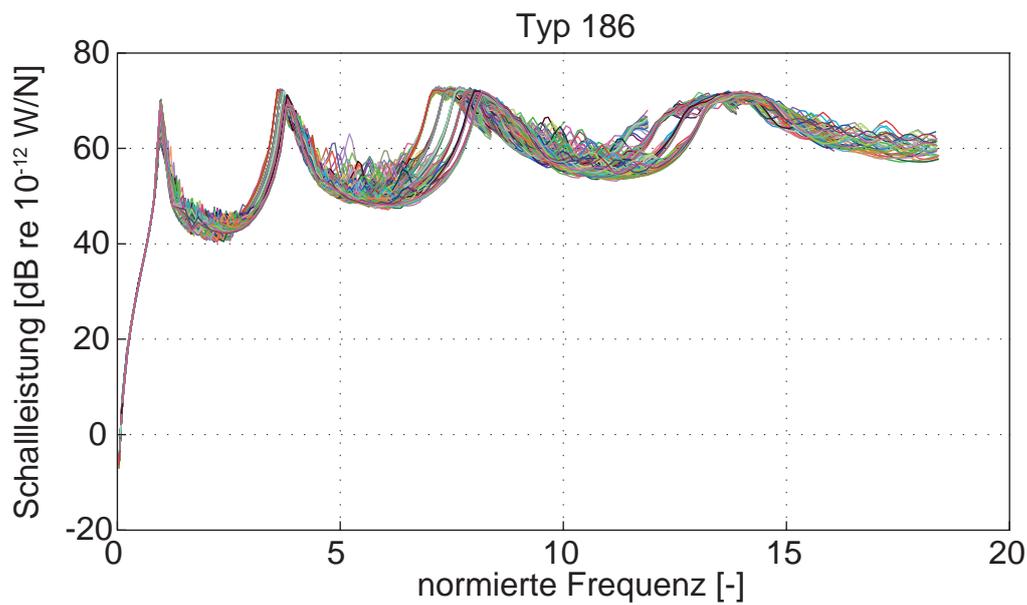


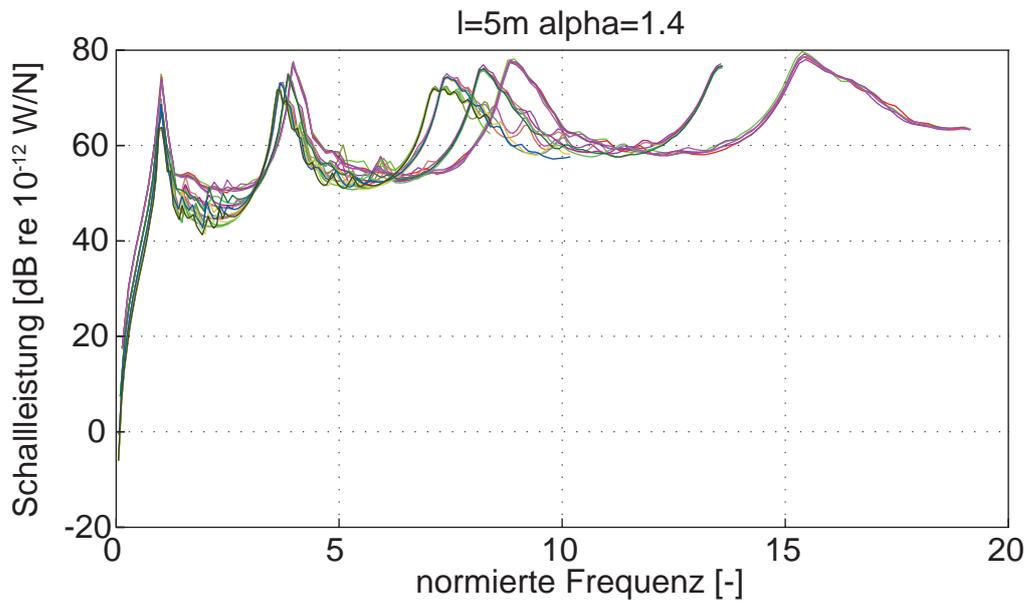
Abbildung A.13: BSD-R Schalleistungs-Nomogramm:  
Längenverhältnis  $\alpha = 1.4$



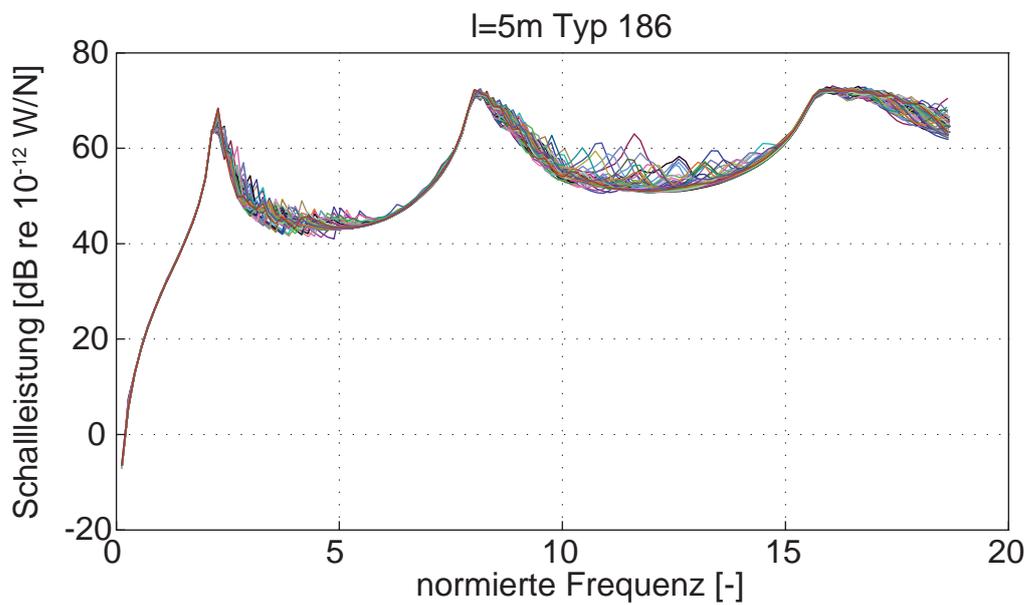
**Abbildung A.14:** BSD-R Schalleistungs-Nomogramm:  
 Länge  $l = 5.0$  m



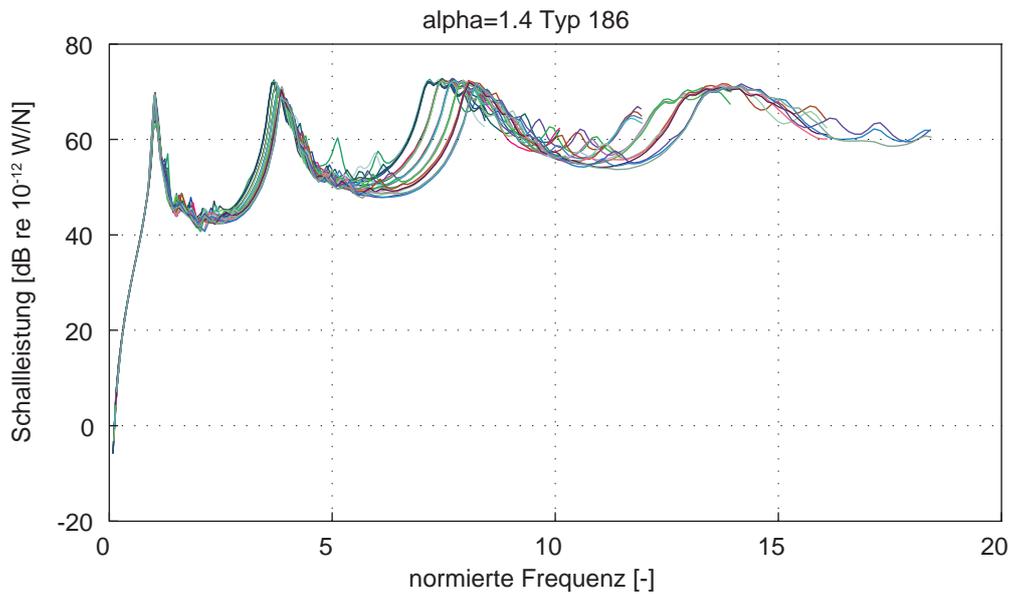
**Abbildung A.15:** BSD-R Schalleistungs-Nomogramm:  
 Steifigkeitsverhältnis  $\beta = 26.4$  (Deckentyp 186)



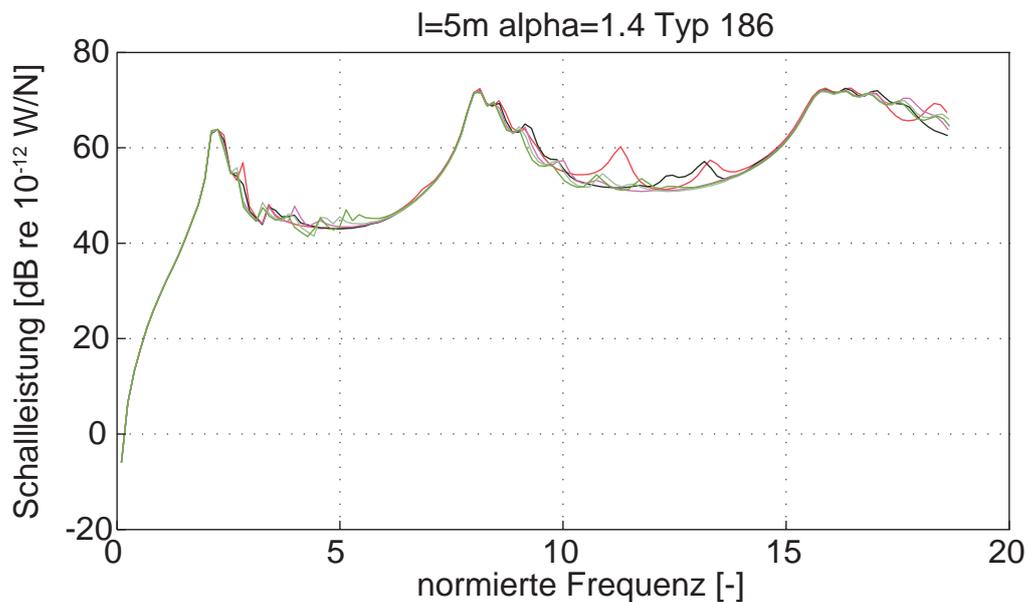
**Abbildung A.16:** BSD-R Schalleistungs-Nomogramm:  
Länge  $l = 5.0$  m; Längenverhältnis  $\alpha = 1.4$



**Abbildung A.17:** BSD-R Schalleistungs-Nomogramm:  
Länge  $l = 5.0$  m; Steifigkeitsverhältnis  $\beta = 26.4$  (Deckentyp 186)

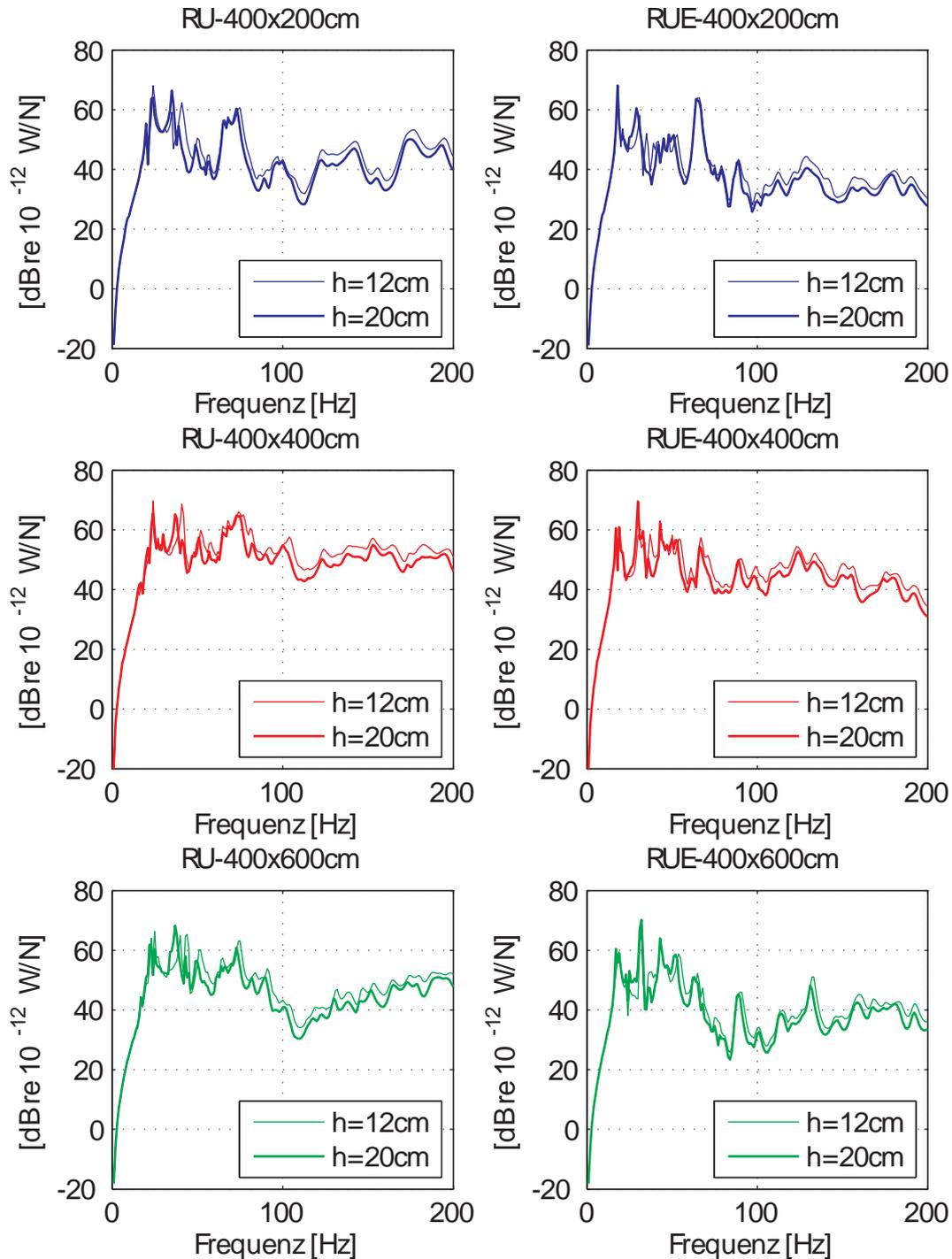


**Abbildung A.18:** BSD-R Schalleistungs-Nomogramm:  
 Längenverhältnis  $\alpha = 1.4$ ; Steifigkeitsverhältnis  $\beta = 26.4$  (Deckentyp 186)

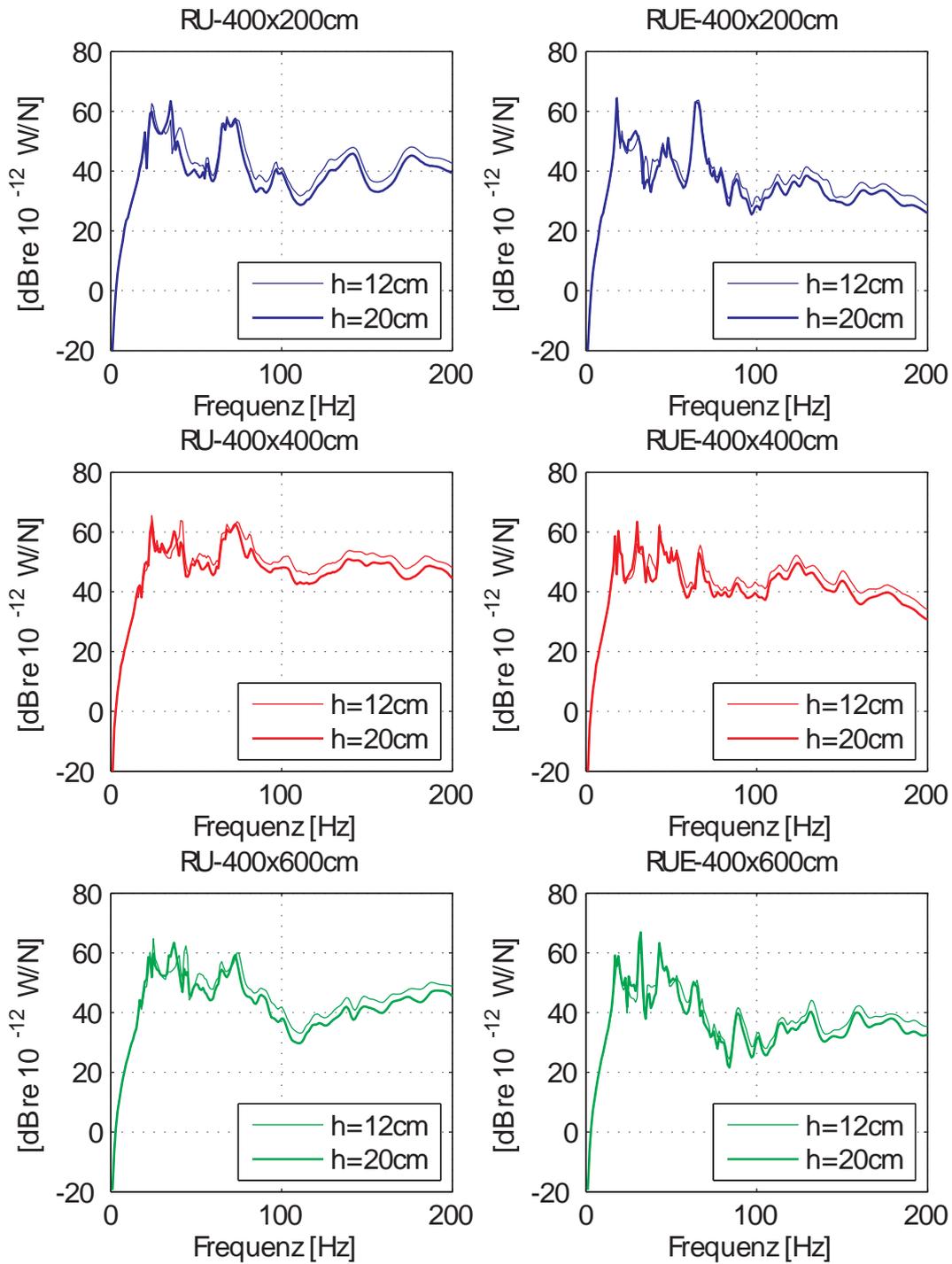


**Abbildung A.19:** BSD-R Schalleistungs-Nomogramm:  
 Länge  $l = 5.0$  m; Längenverhältnis  $\alpha = 1.4$ ;  
 Steifigkeitsverhältnis  $\beta = 26.4$  (Deckentyp 186)

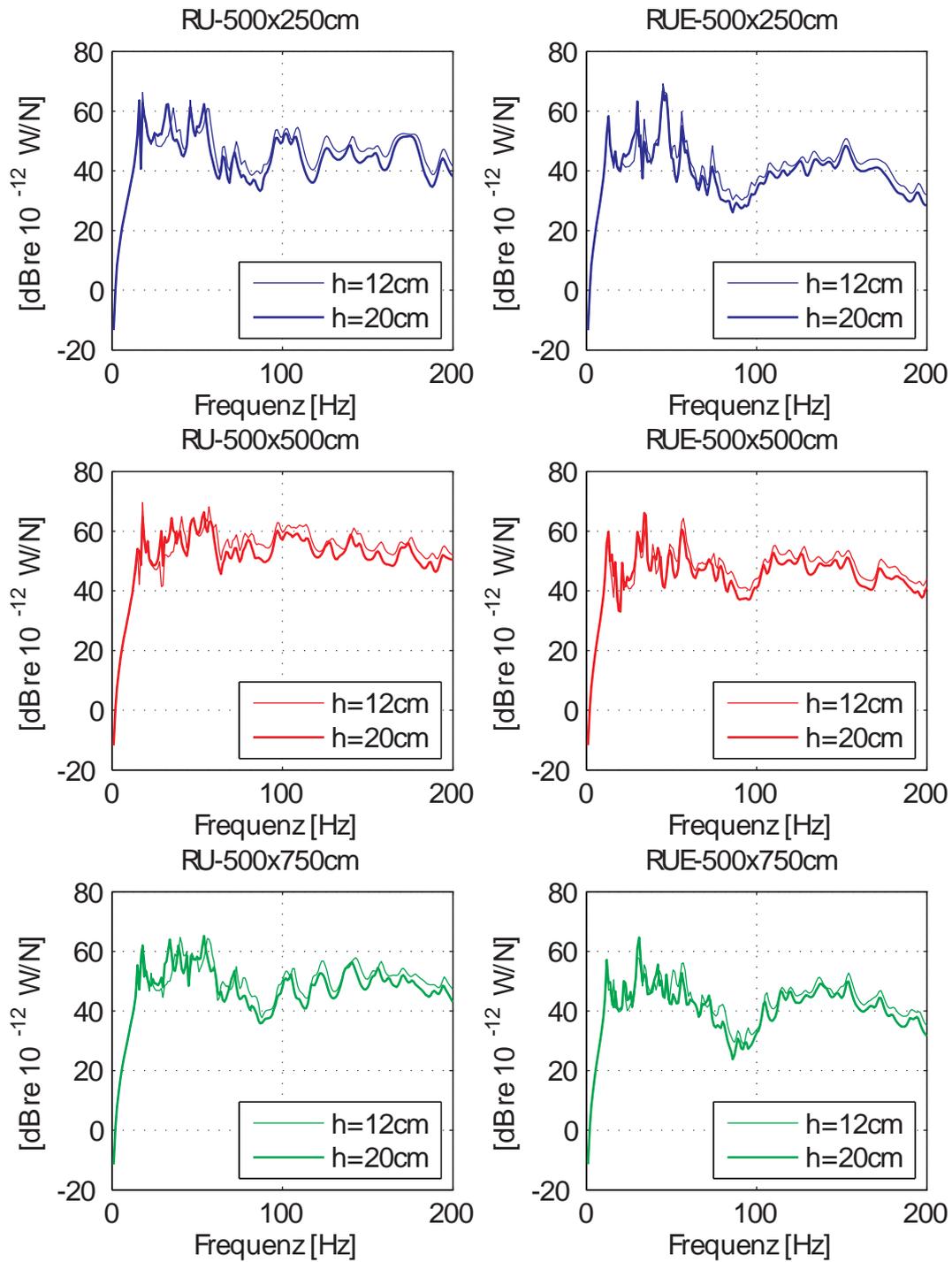
## A.2.2 Vergleich der Abhängigkeiten



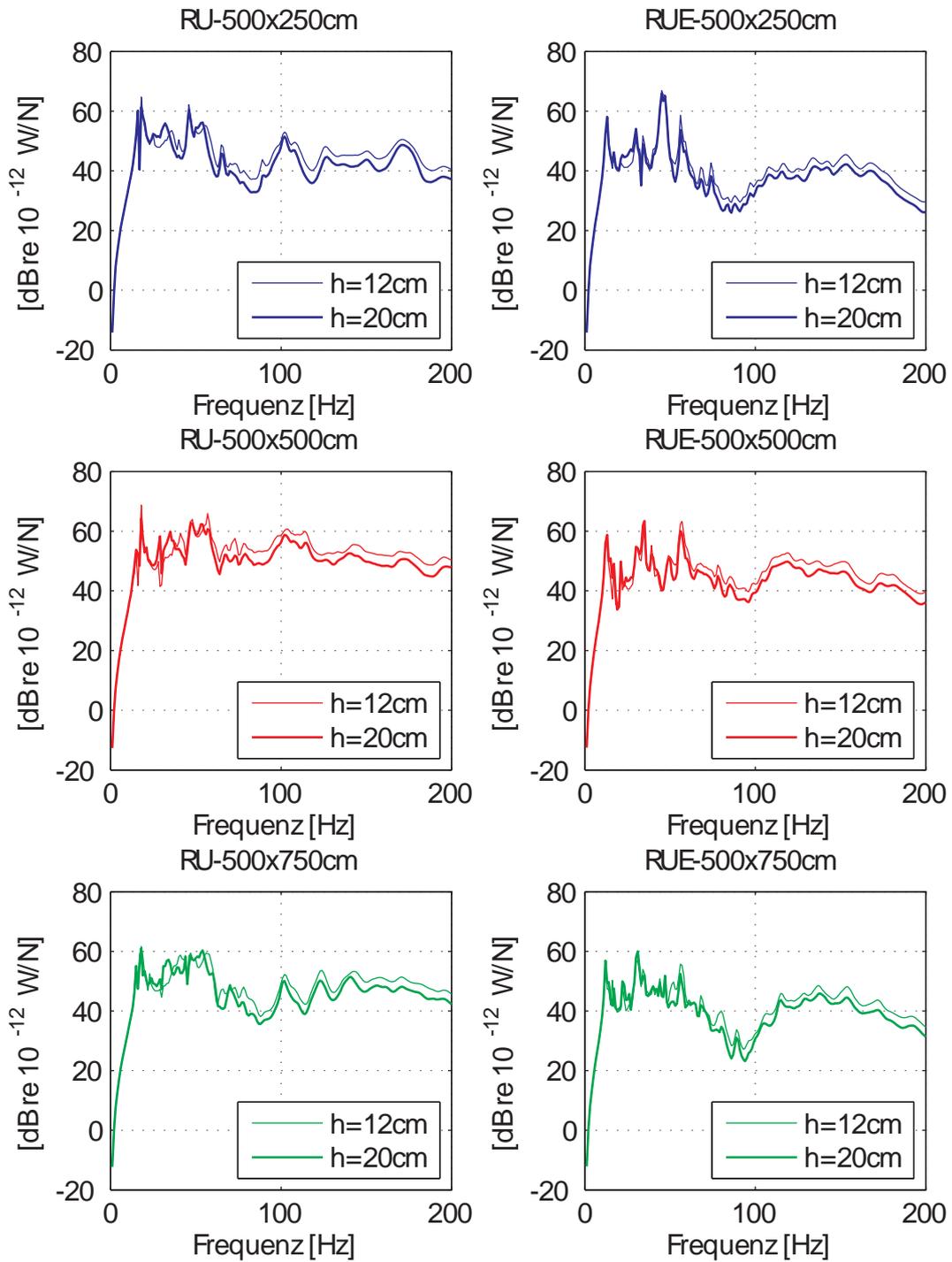
**Abbildung A.20:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Abhängigkeiten, Länge  $l = 400$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Absorptionsgrad: 3%



**Abbildung A.21:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Abhängigkeiten, Länge  $l = 400$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Absorptionsgrad: 10%

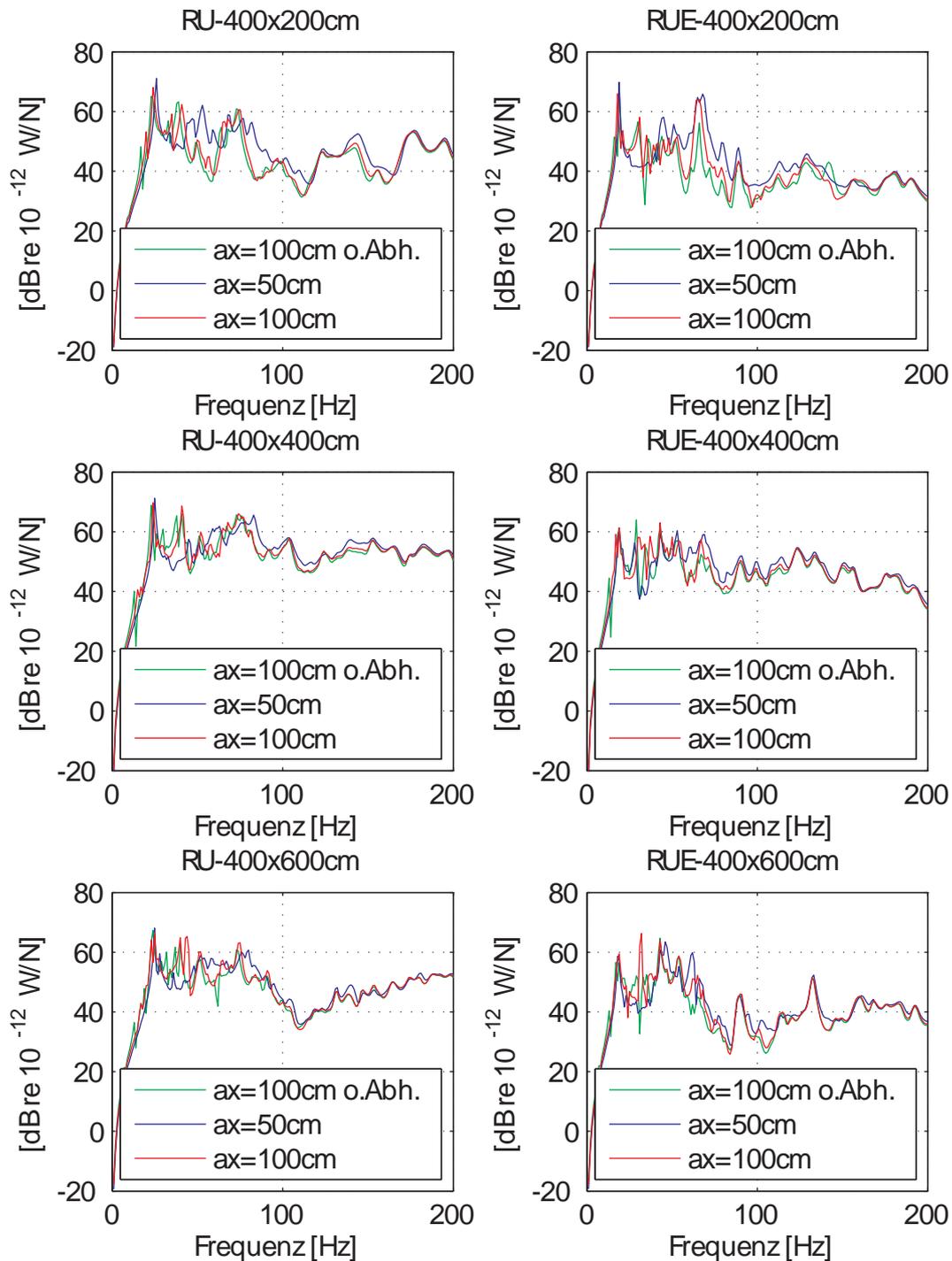


**Abbildung A.22:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Abhängehöhen, Länge  $l = 500 \text{ cm}$ , Rasterabstand  $a_y = 100 \text{ cm}$  Absorptionsgrad: 3%

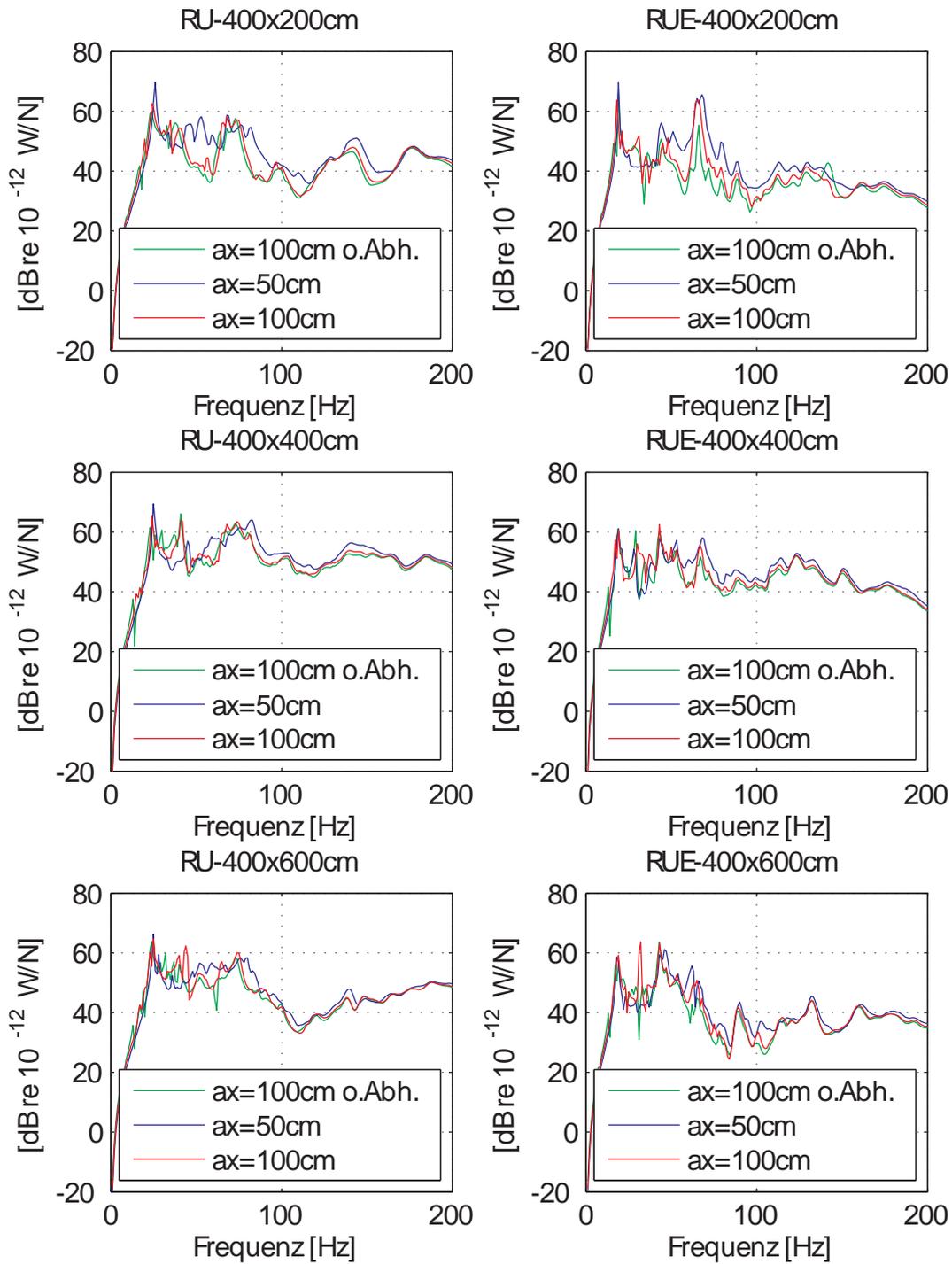


**Abbildung A.23:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Abhängigkeiten, Länge  $l = 500 \text{ cm}$ , Rasterabstand  $a_y = 100 \text{ cm}$  Absorptionsgrad: 10%

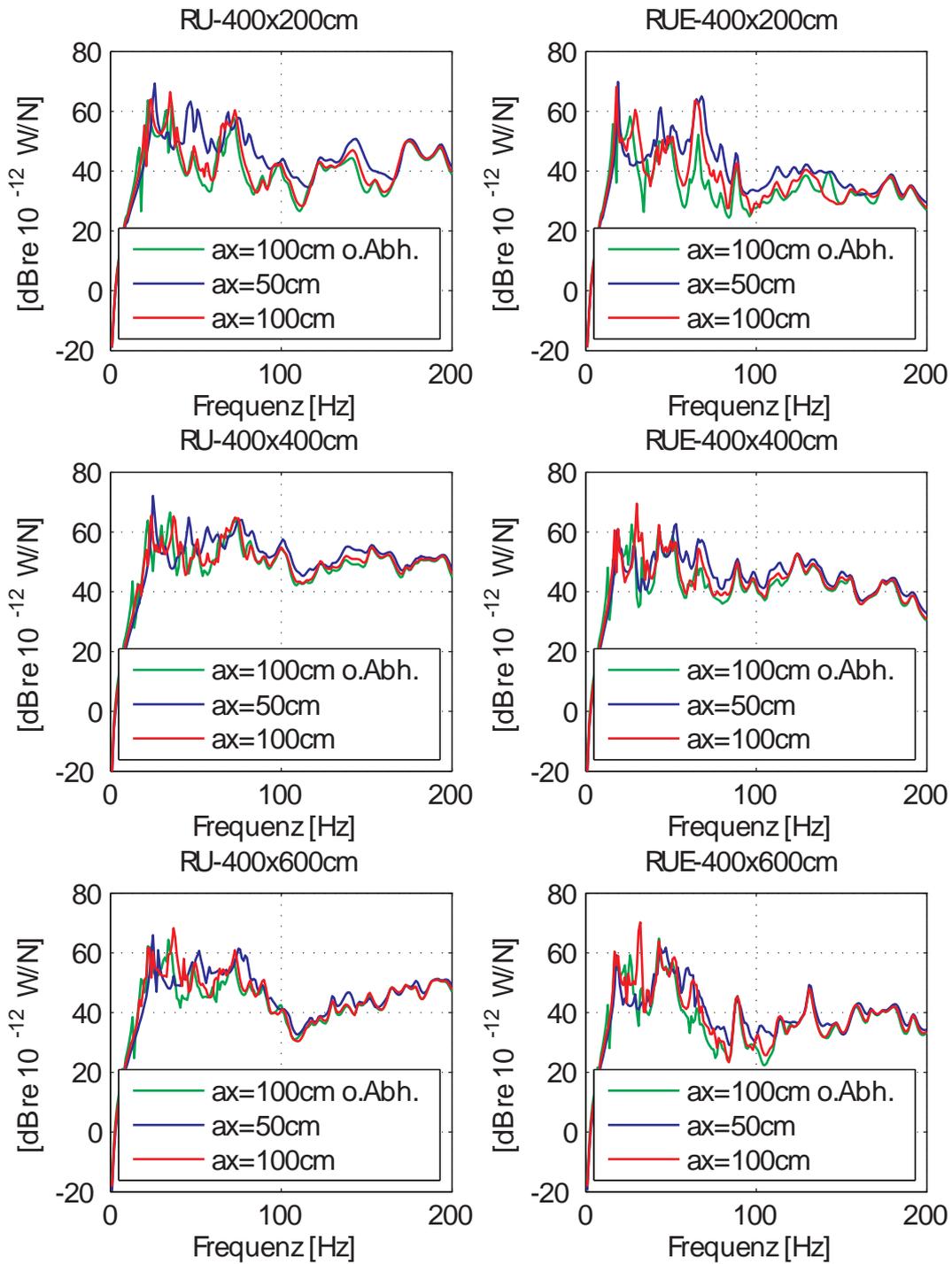
### A.2.3 Vergleich der Raster der Traglattung (mit und ohne Abhänger)



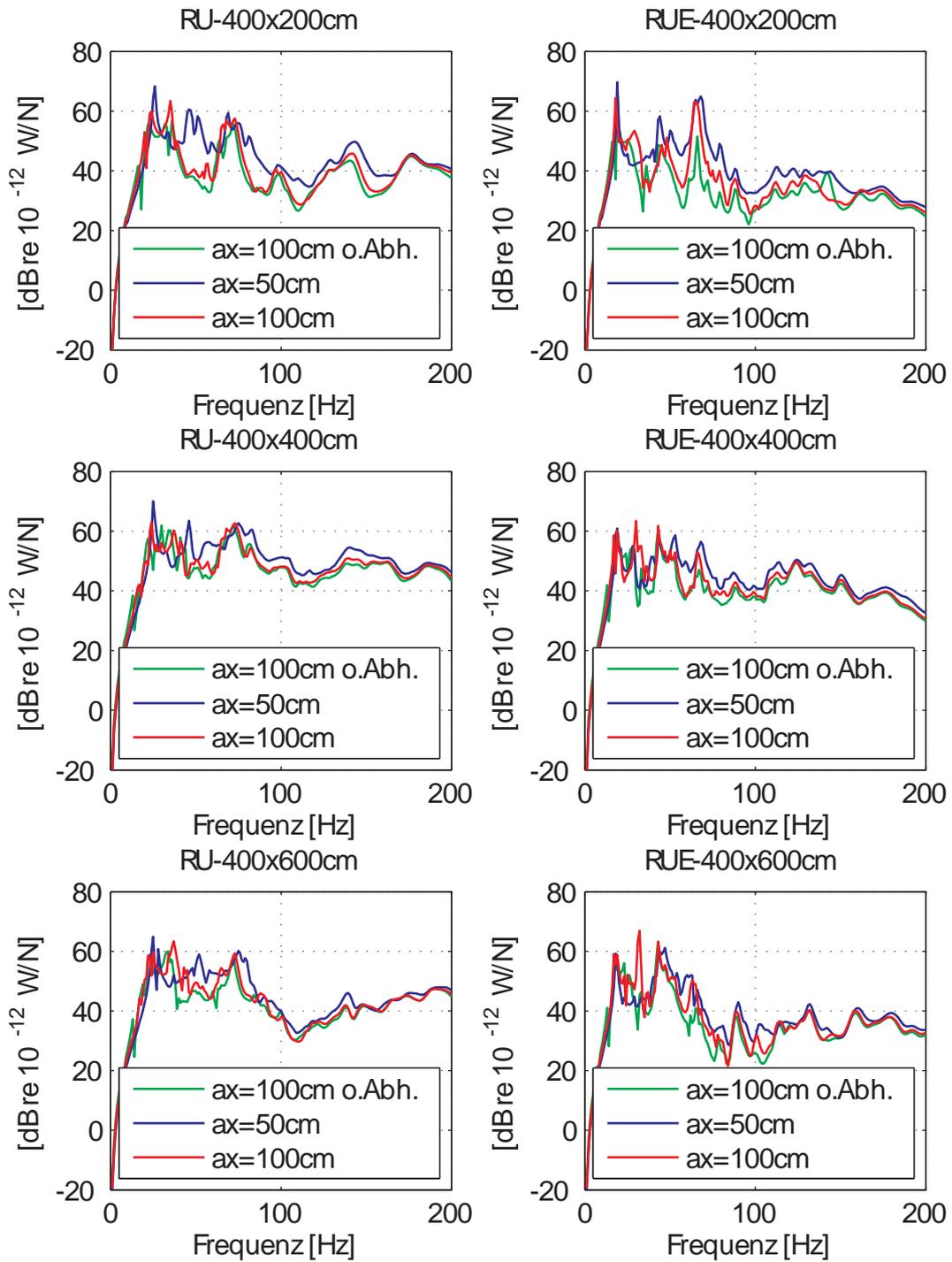
**Abbildung A.24:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Rasterabstände, Länge  $l = 400$  cm, Abhängehöhe  $h = 12$  cm Absorptionsgrad: 3%



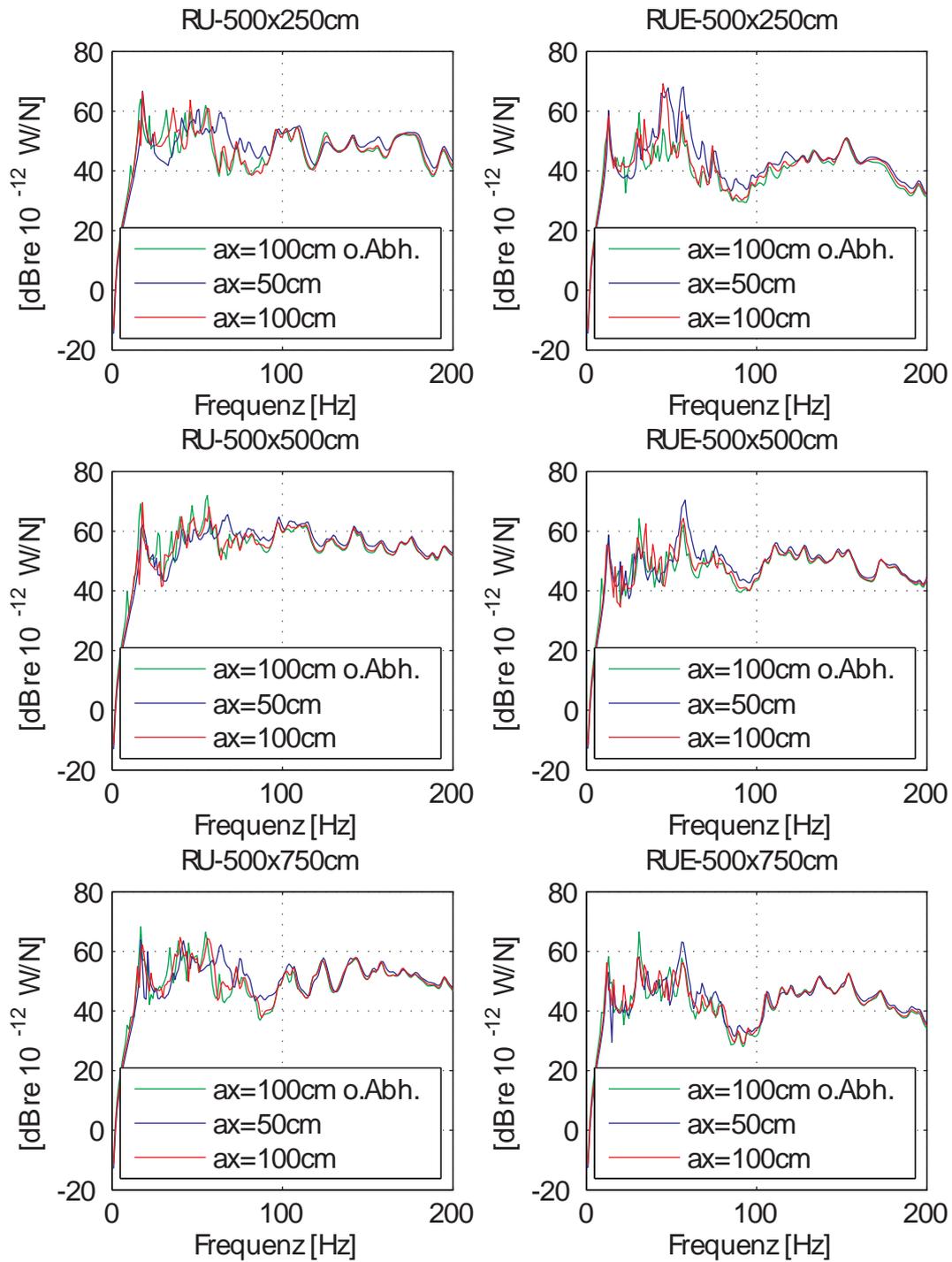
**Abbildung A.25:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Rasterabstände, Länge  $l = 400$  cm, Abhängehöhe  $h = 12$  cm Absorptionsgrad: 10%



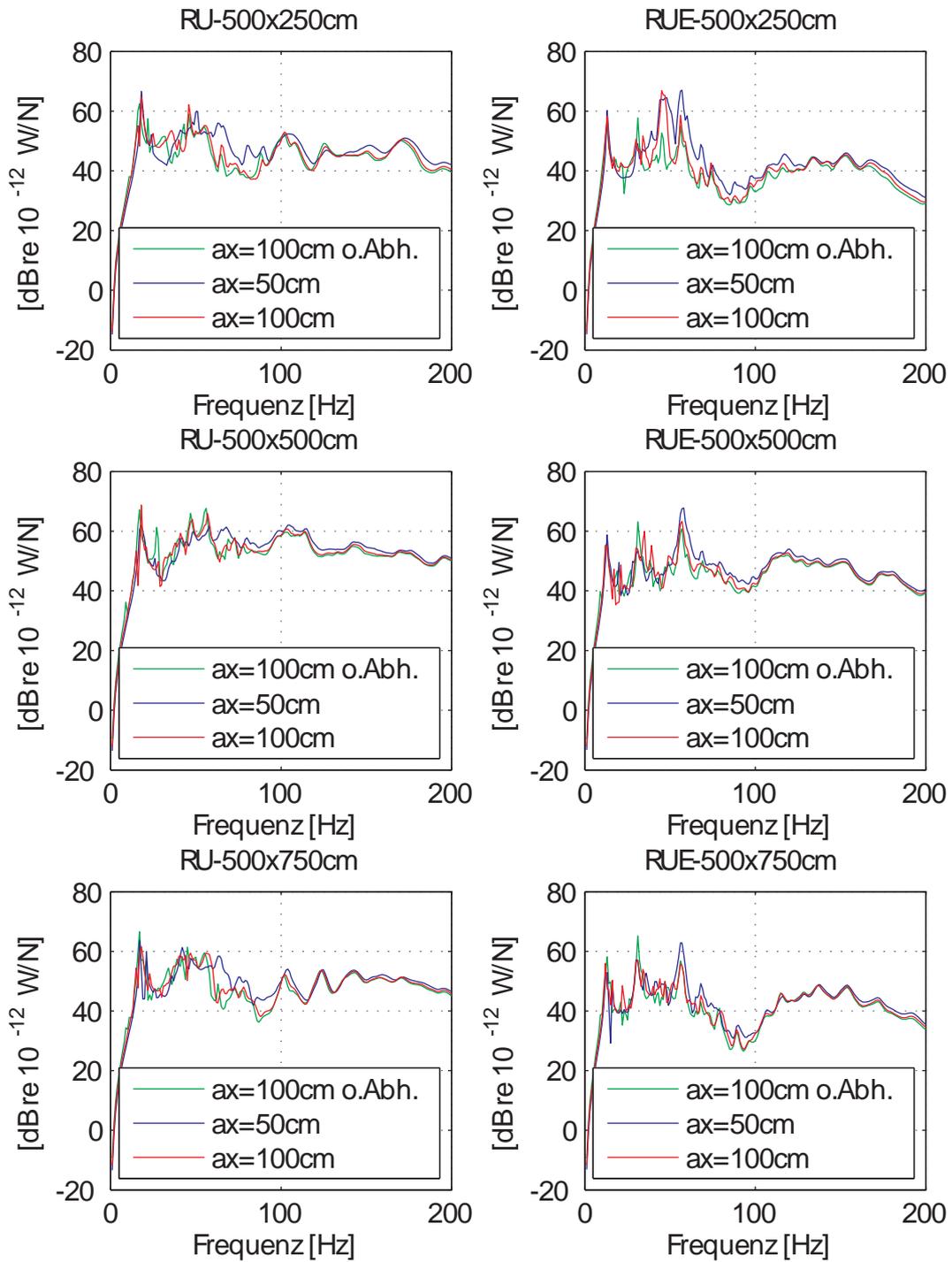
**Abbildung A.26:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Rasterabstände, Länge  $l = 400$  cm, Abhängehöhe  $h = 20$  cm Absorptionsgrad: 3%



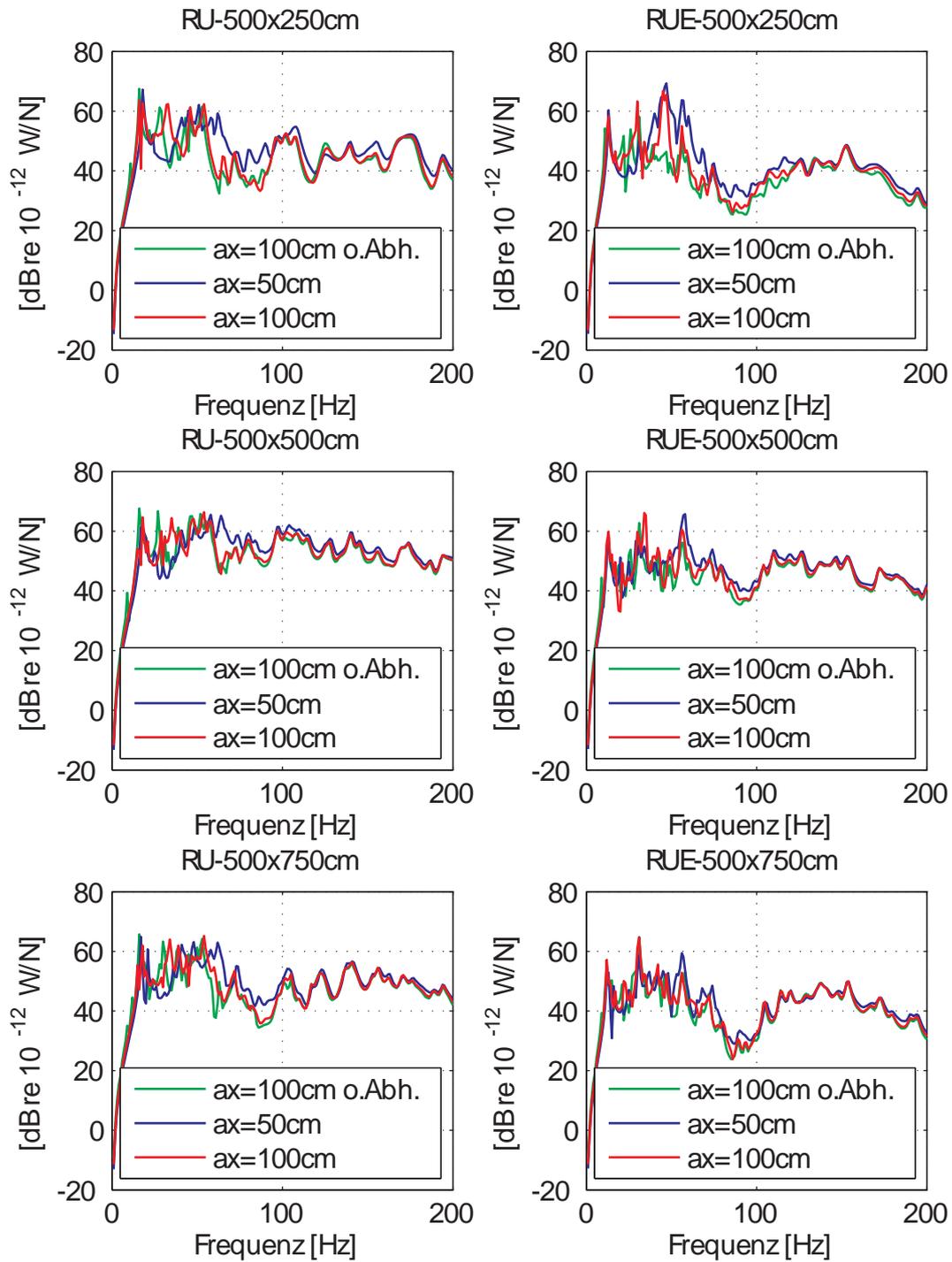
**Abbildung A.27:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Rasterabstände, Länge  $l = 400$  cm, Abhängehöhe  $h = 20$  cm Absorptionsgrad: 10%



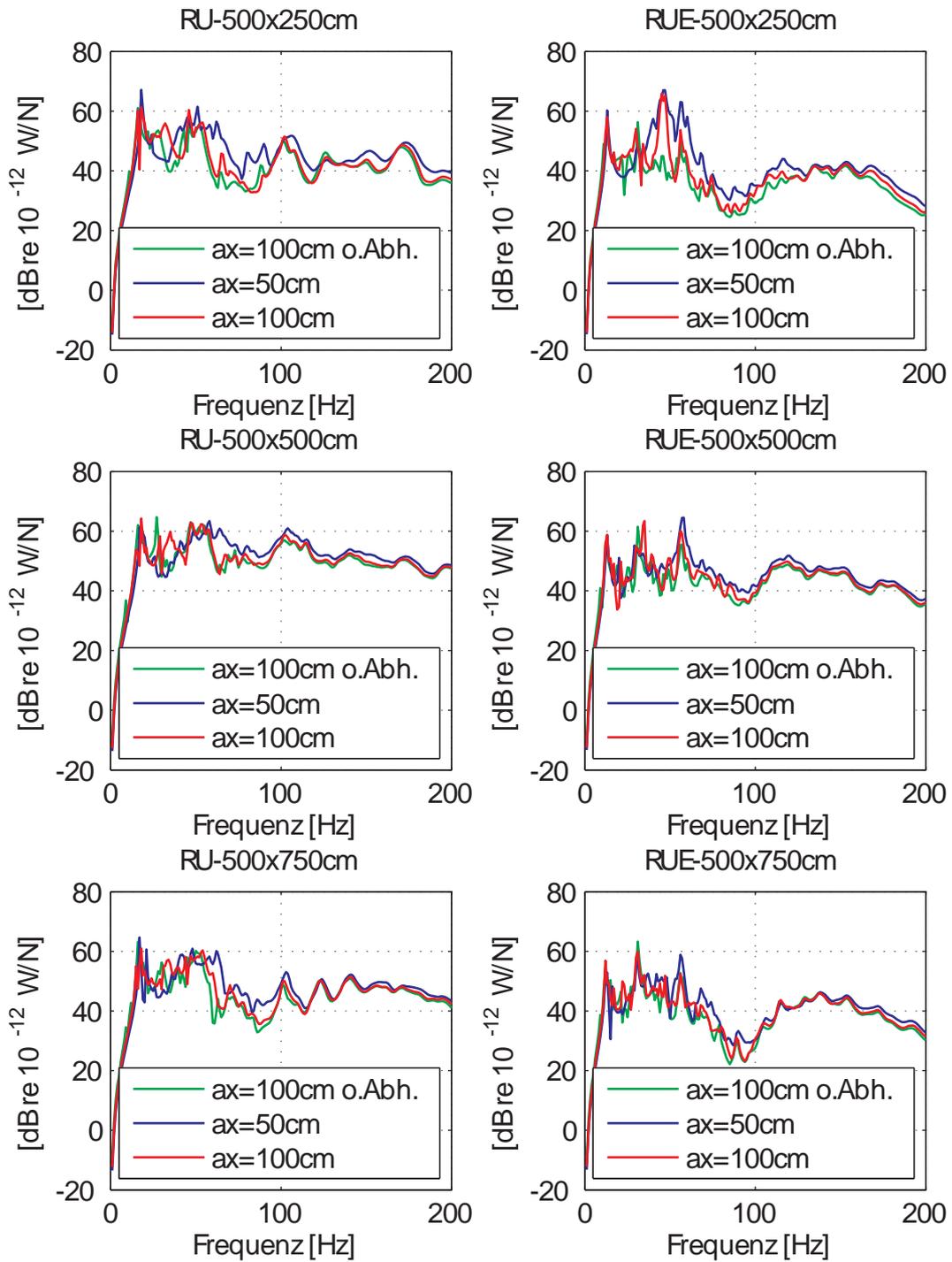
**Abbildung A.28:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Rasterabstände, Länge  $l = 500$  cm, Abhängehöhe  $h = 12$  cm Absorptionsgrad: 3%



**Abbildung A.29:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Rasterabstände, Länge  $l = 500$  cm, Abhängehöhe  $h = 12$  cm Absorptionsgrad: 10%

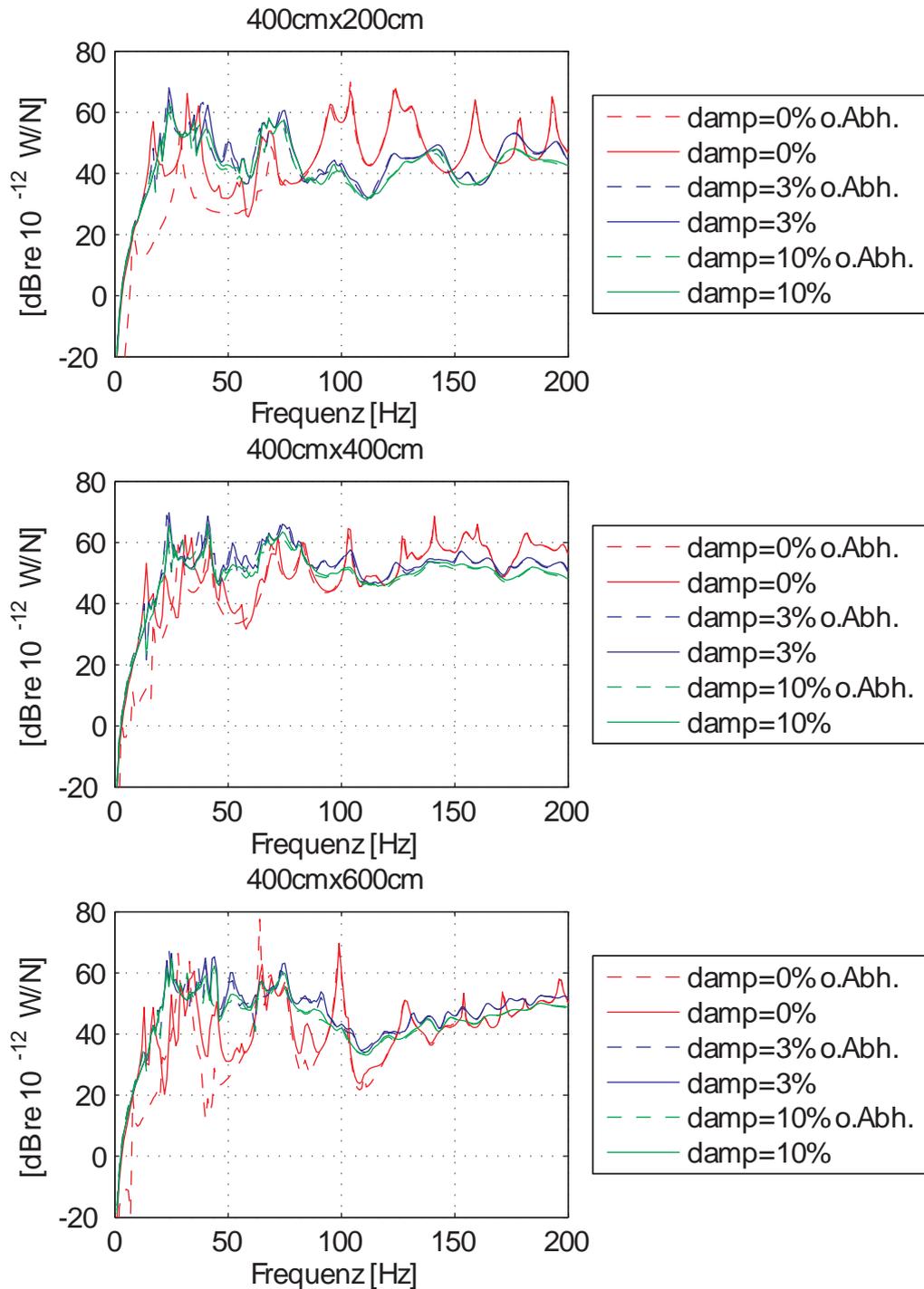


**Abbildung A.30:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Rasterabstände, Länge  $l = 500$  cm, Abhängehöhe  $h = 20$  cm Absorptionsgrad: 3%

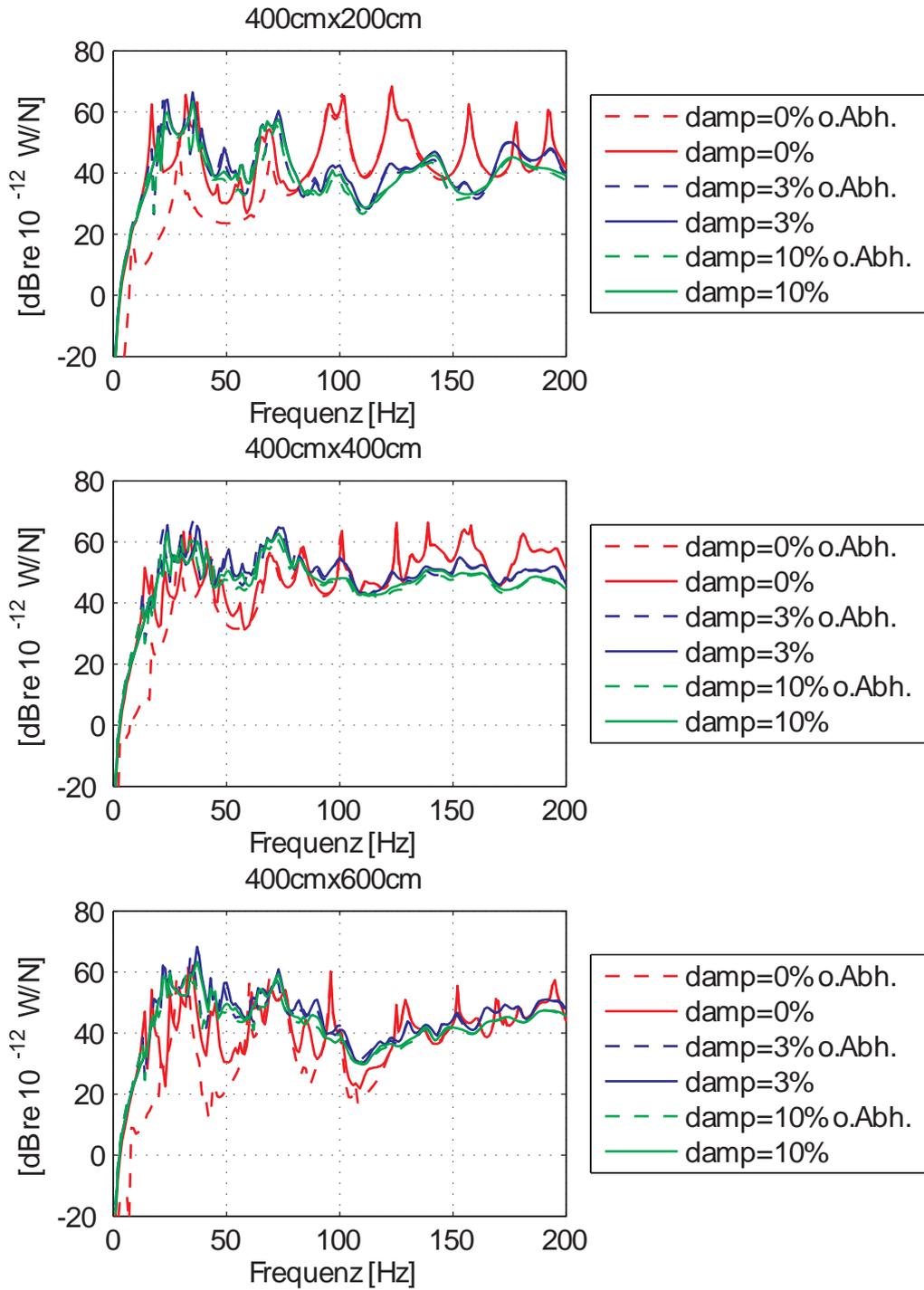


**Abbildung A.31:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Vergleich der Rasterabstände, Länge  $l = 500$  cm, Abhängehöhe  $h = 20$  cm, Absorptionsgrad: 10%

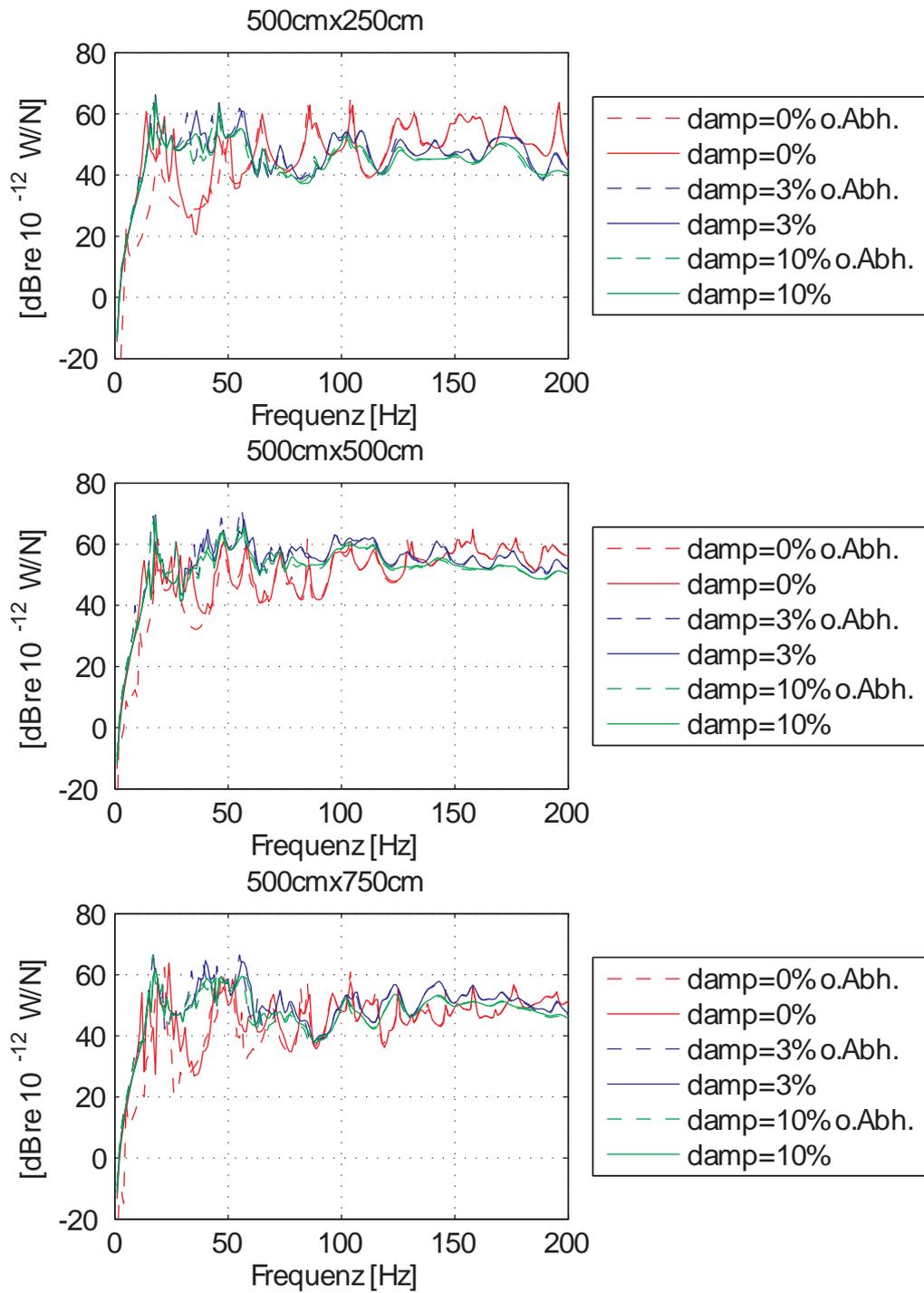
## A.2.4 Vergleich der Absorptionsraten



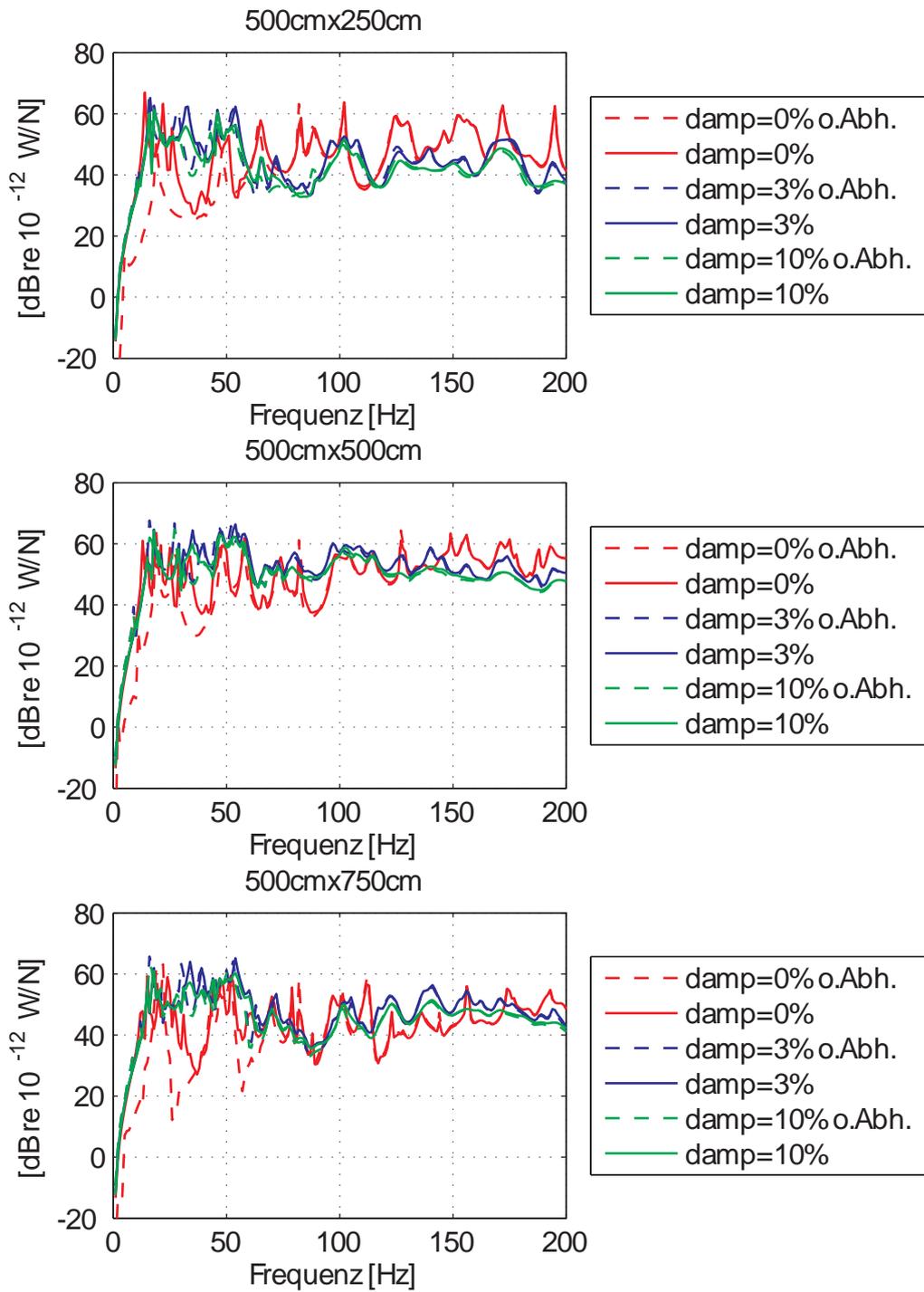
**Abbildung A.32:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RU, Vergleich der Absorptionsraten, Länge  $l = 400$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Abhängehöhe  $h = 12$  cm



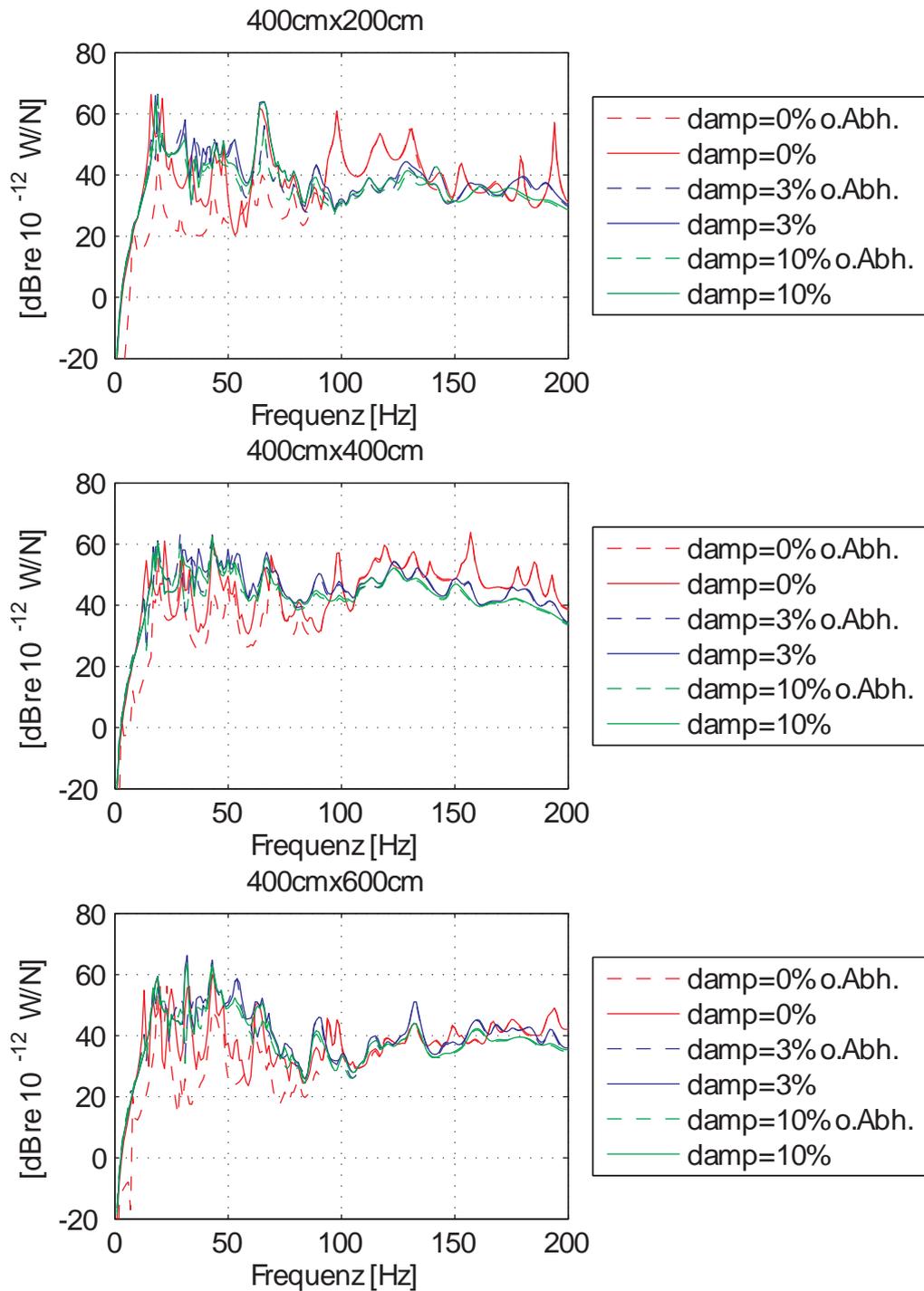
**Abbildung A.33:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RU, Vergleich der Absorptionsraten, Länge  $l = 400$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Abhängehöhe  $h = 20$  cm



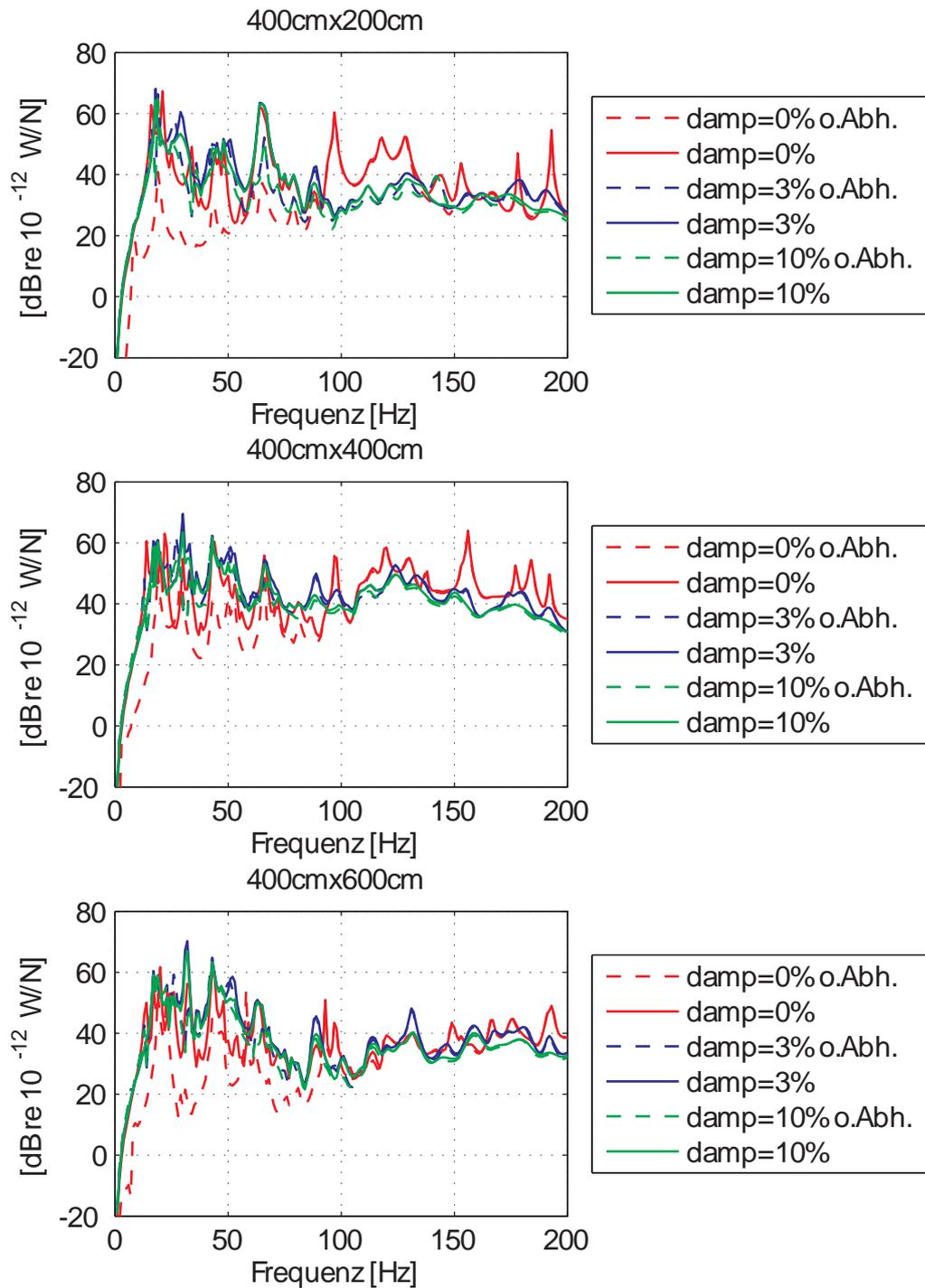
**Abbildung A.34:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RU, Vergleich der Absoptrionsraten, Länge  $l = 500$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Abhängehöhe  $h = 12$  cm



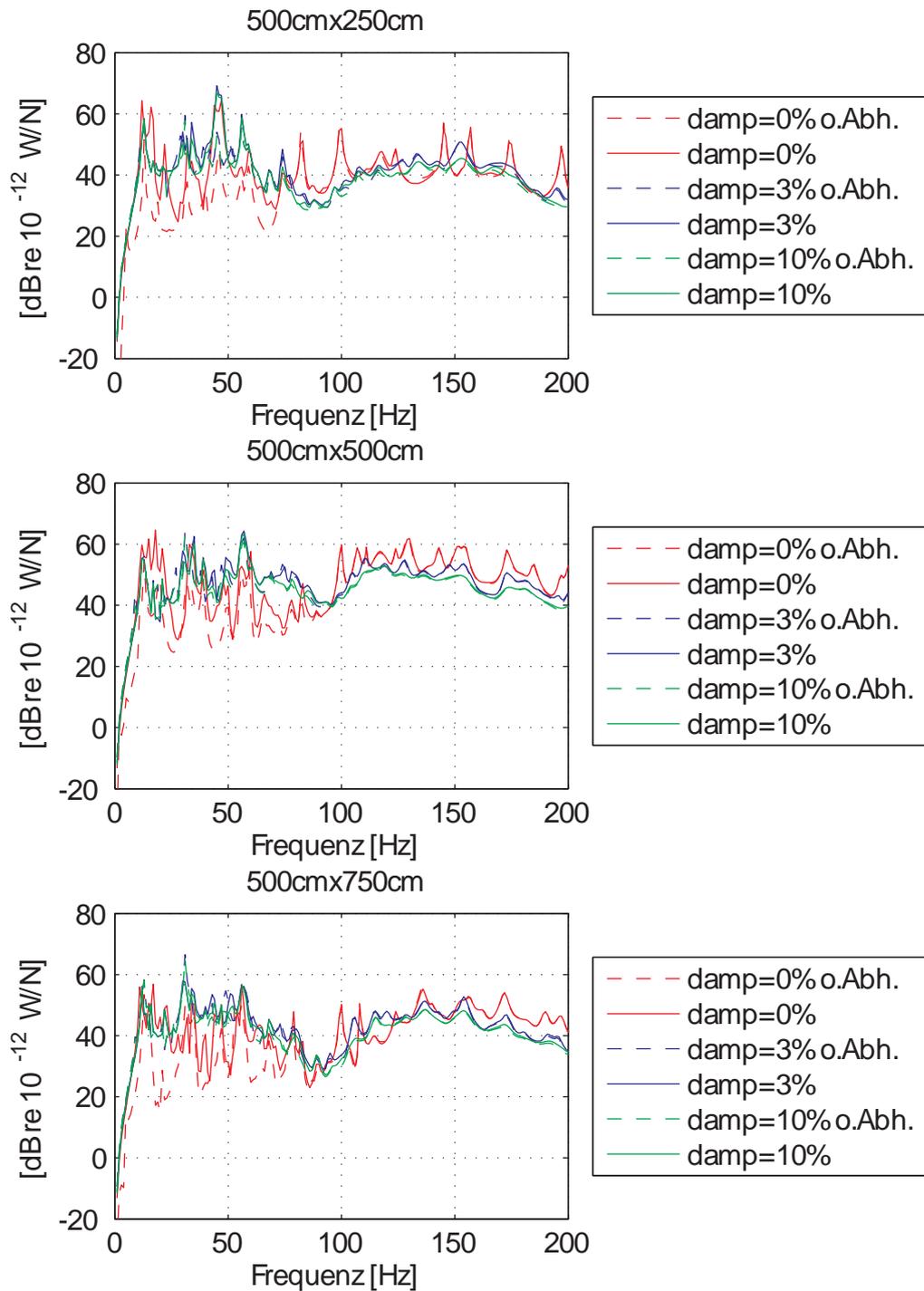
**Abbildung A.35:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RU, Vergleich der Absorptionsraten, Länge  $l = 500$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Abhängehöhe  $h = 20$  cm



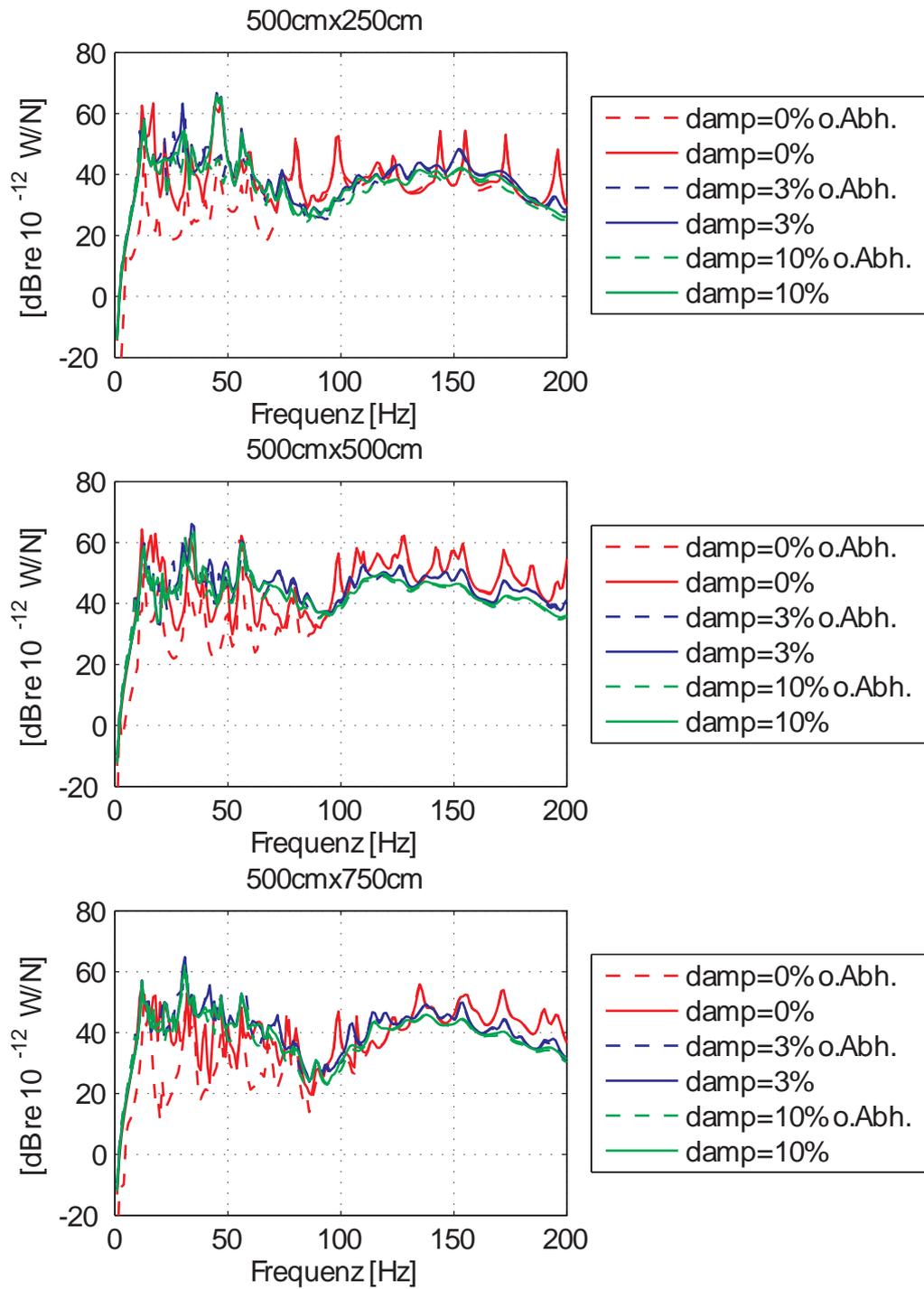
**Abbildung A.36:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RUE, Vergleich der Absorptionsraten, Länge  $l = 400$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Abhängenhöhe  $h = 12$  cm



**Abbildung A.37:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RUE, Vergleich der Absorptionsraten, Länge  $l = 400$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Abhängehöhe  $h = 20$  cm



**Abbildung A.38:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RUE, Vergleich der Absoptrionsraten, Länge  $l = 500$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Abhängehöhe  $h = 12$  cm



**Abbildung A.39:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RUE, Vergleich der Absorptionsraten, Länge  $l = 500$  cm, Rasterabstand  $a_y = 100$  cm Abhängehöhe  $h = 20$  cm

## A.2.5 Vergleich der Längenverhältnisse (Einzelmessungen und Mittelwerte)

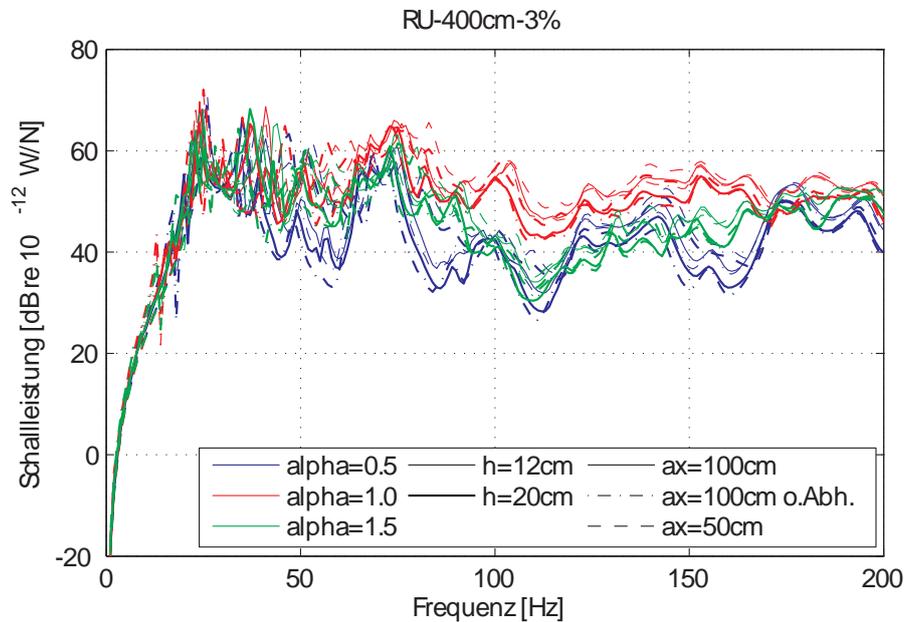


Abbildung A.40: BSD-RU, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 3%

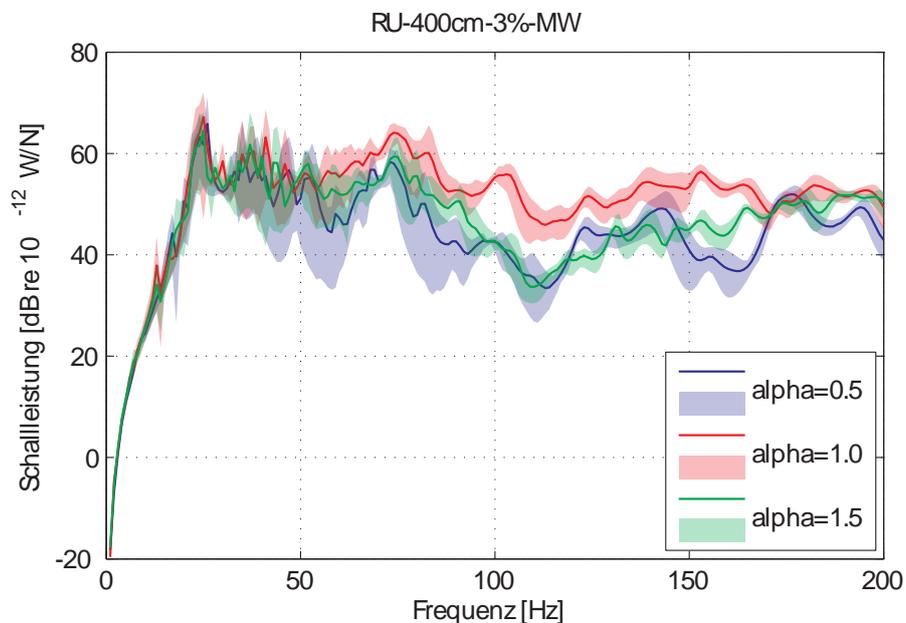


Abbildung A.41: BSD-RU, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 3%, Mittelwert und Wertebereich

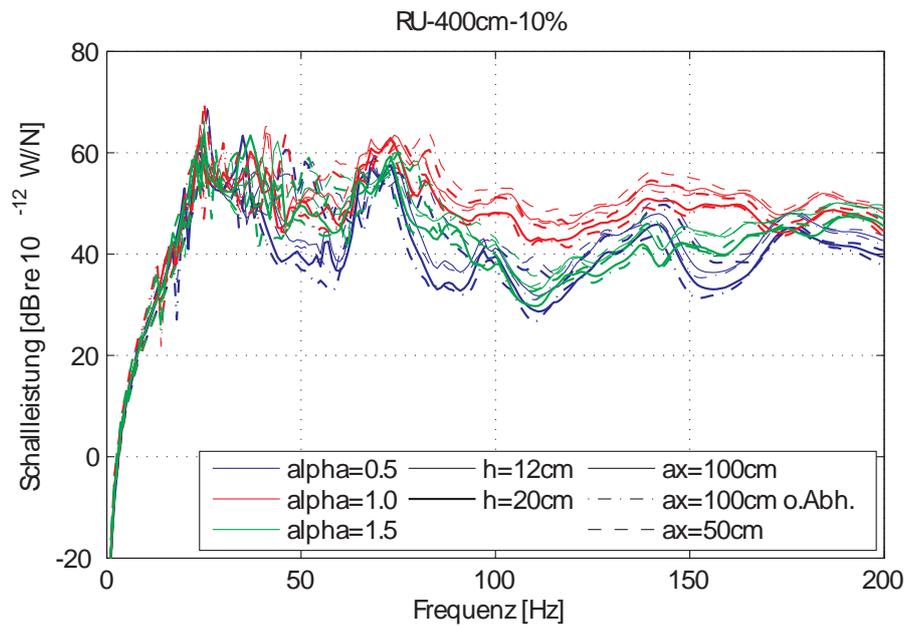


Abbildung A.42: BSD-RU, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 10%

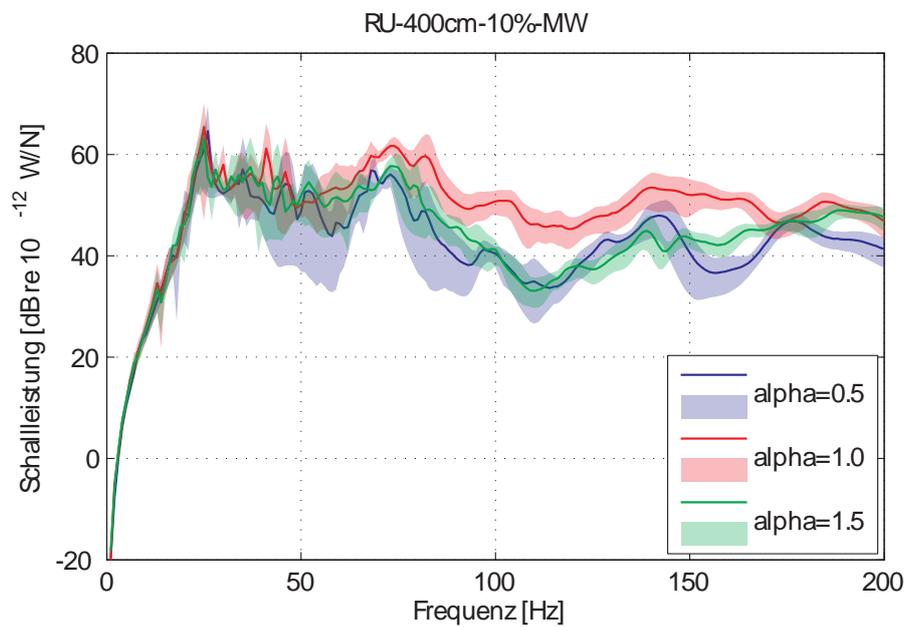


Abbildung A.43: BSD-RU, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 10%, Mittelwert und Wertebereich

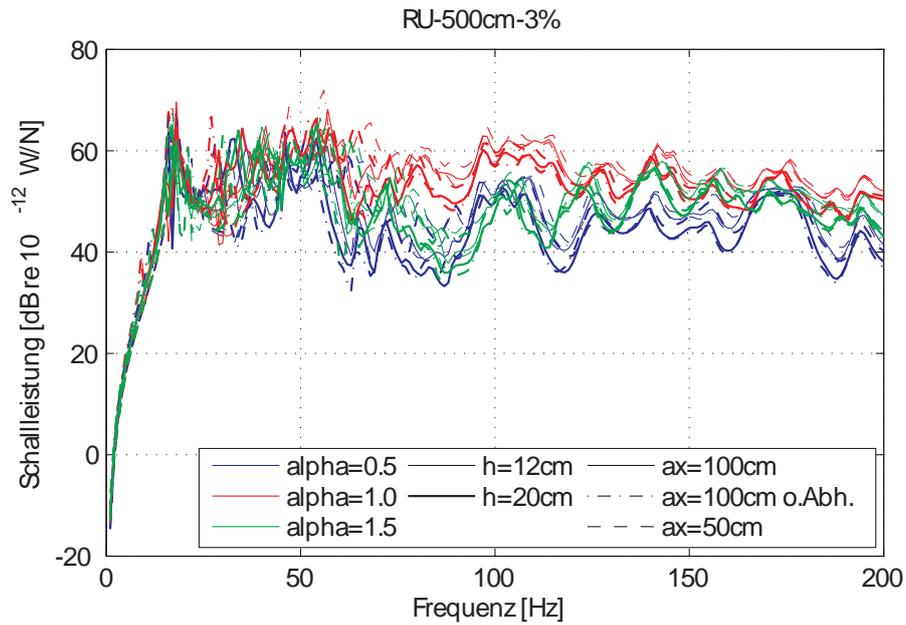


Abbildung A.44: BSD-RU, Länge  $l = 500$  cm, Absorptionsgrad: 3%

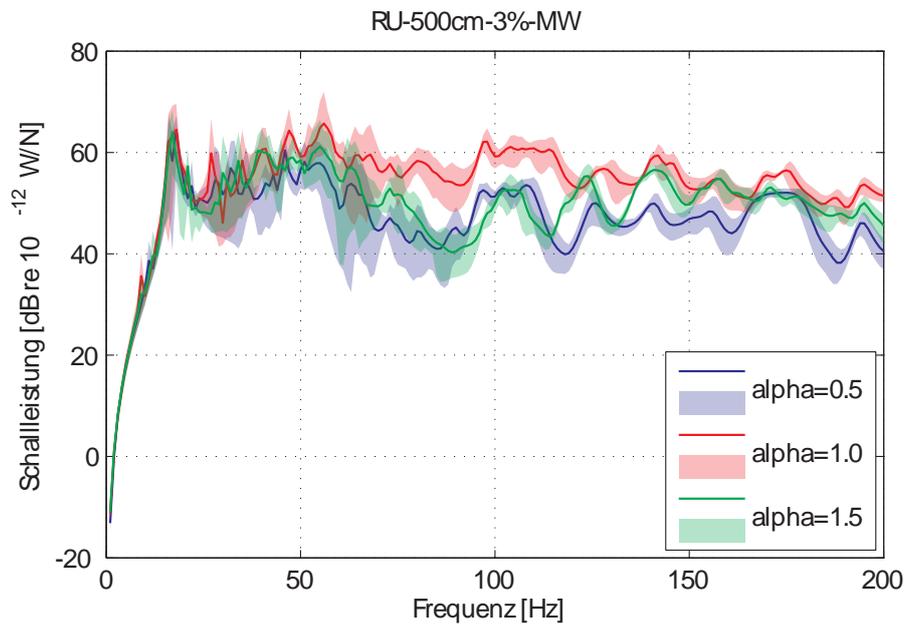


Abbildung A.45: BSD-RU, Länge  $l = 500$  cm, Absorptionsgrad: 3%, Mittelwert und Wertebereich

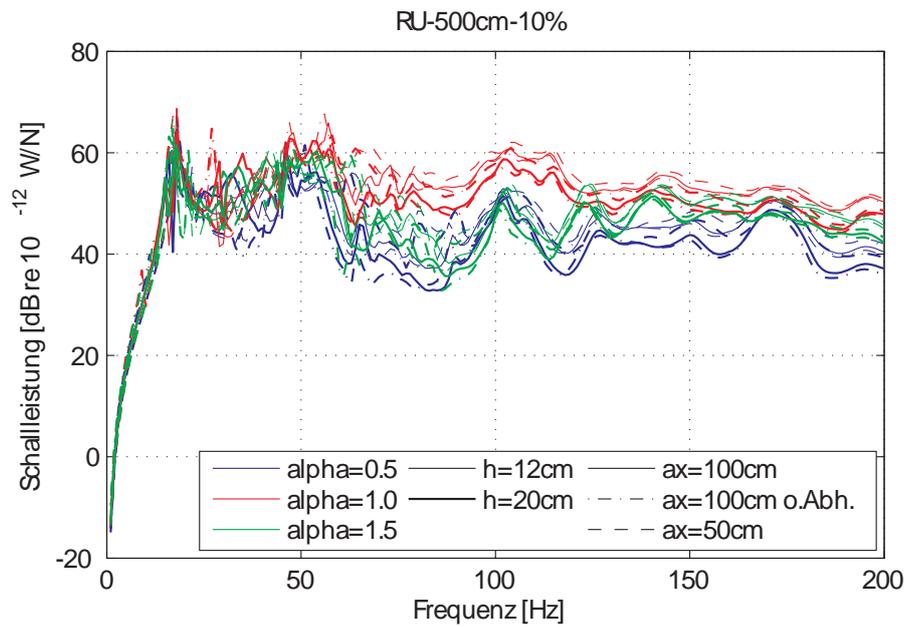


Abbildung A.46: BSD-RU, Länge  $l = 500$  cm, Absorptionsgrad: 10%

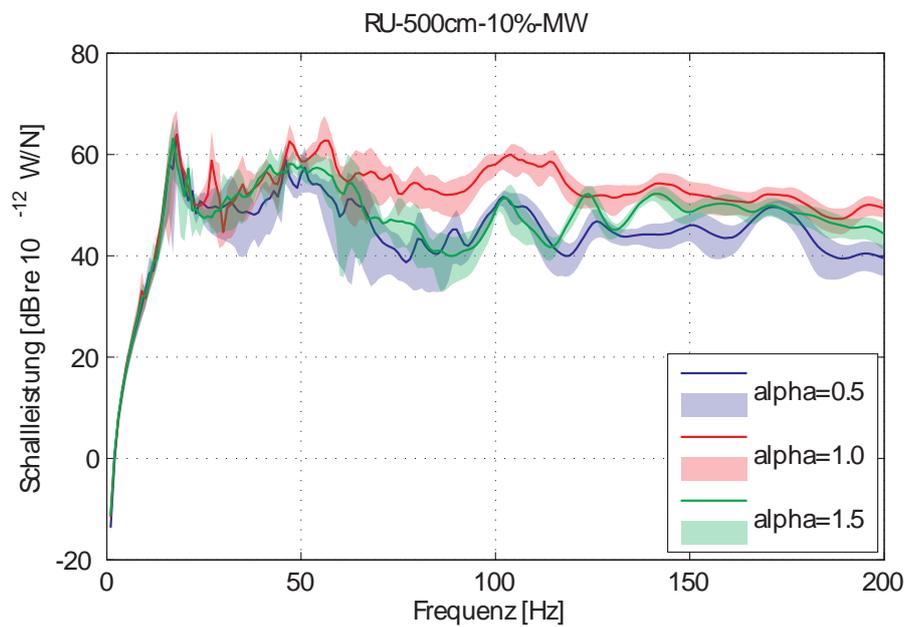
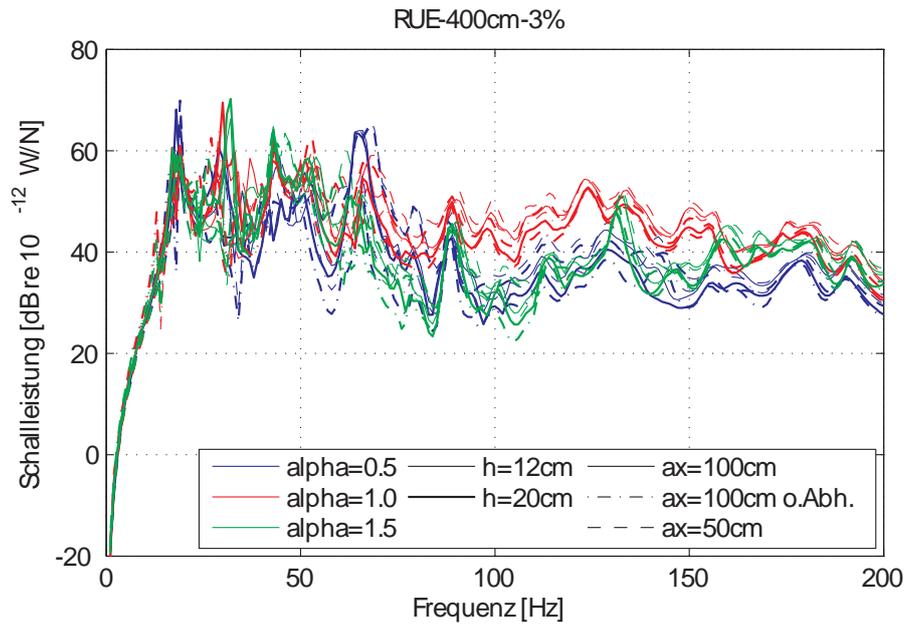
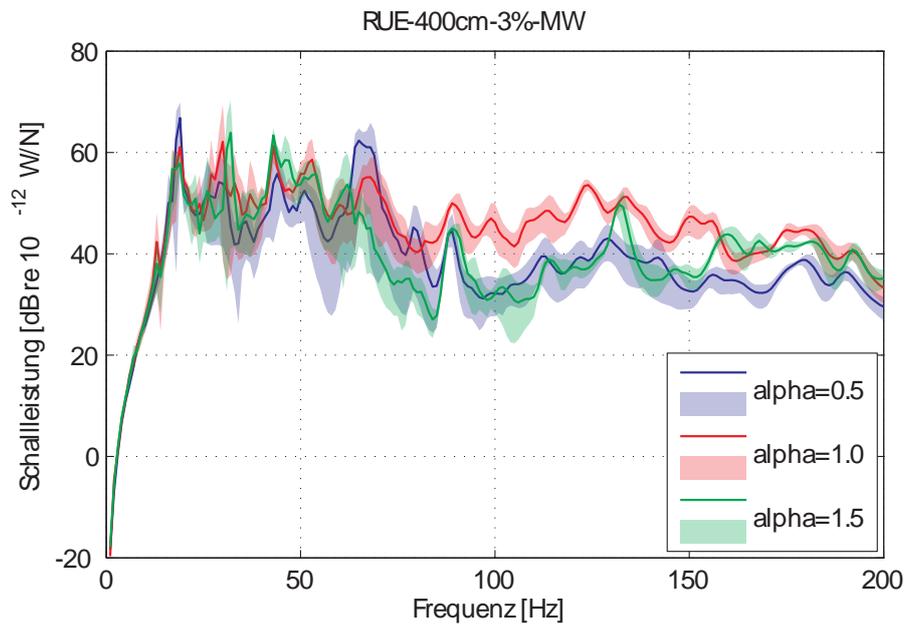


Abbildung A.47: BSD-RU, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 10%, Mittelwert und Wertebereich



**Abbildung A.48:** BSD-RUE, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 3%



**Abbildung A.49:** BSD-RUE, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 3%, Mittelwert und Wertebereich

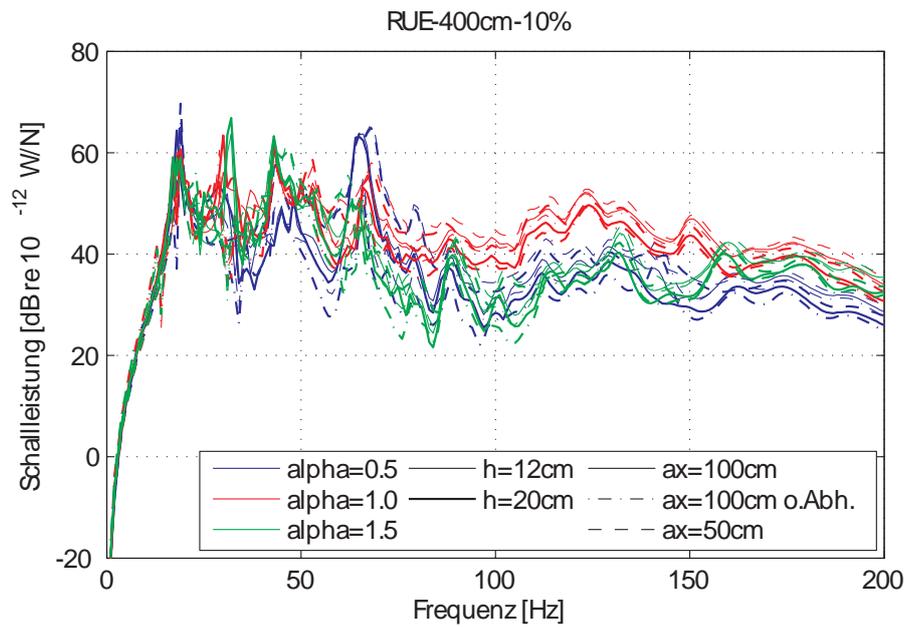


Abbildung A.50: BSD-RUE, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 10%

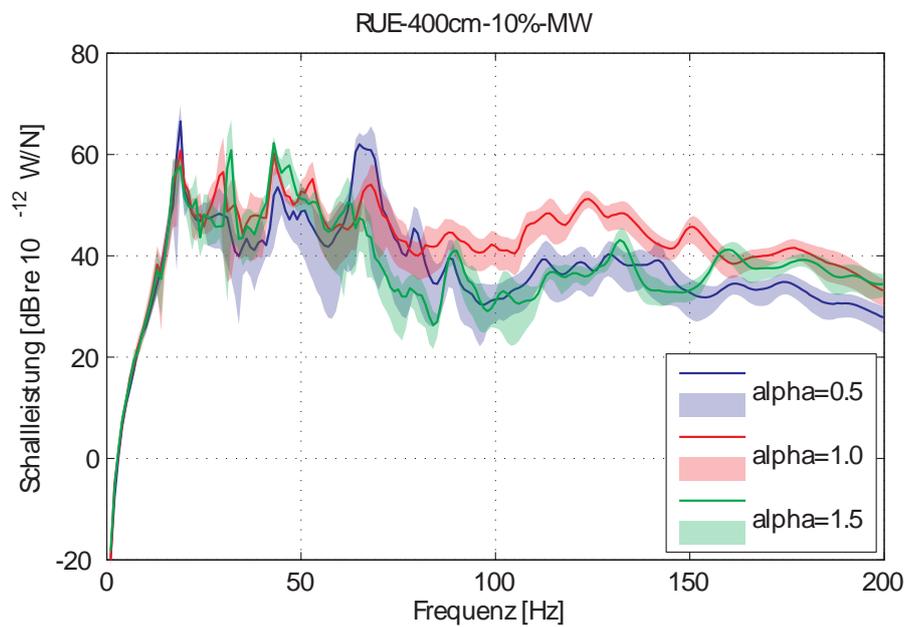


Abbildung A.51: BSD-RUE, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 10%, Mittelwert und Wertebereich

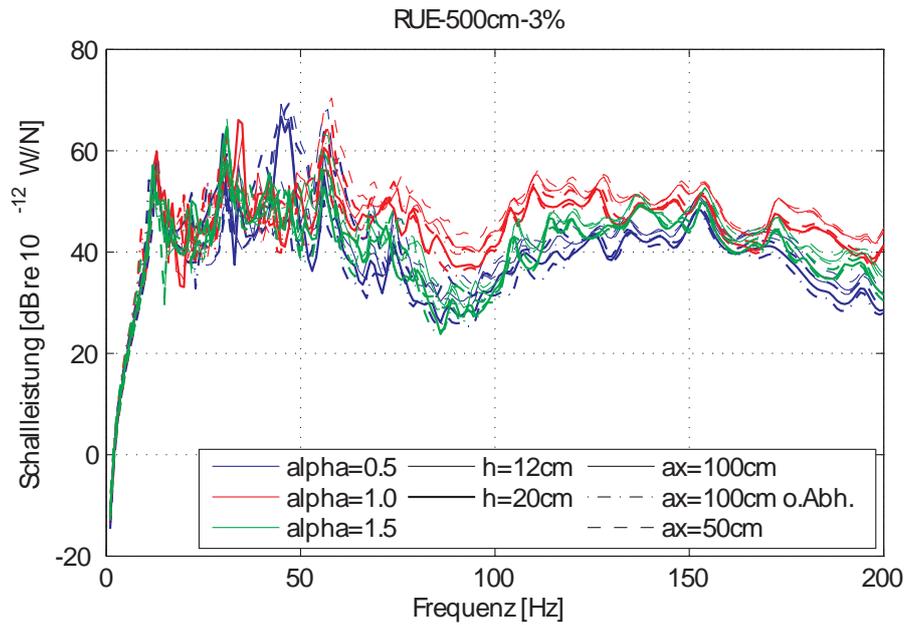


Abbildung A.52: BSD-RUE, Länge  $l = 500$  cm, Absorptionsgrad: 3%

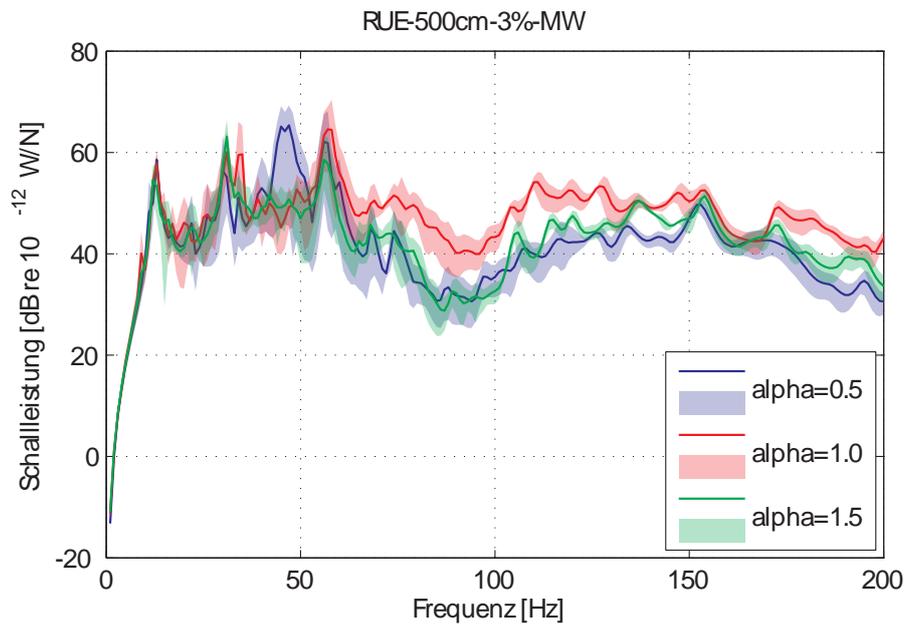


Abbildung A.53: BSD-RUE, Länge  $l = 500$  cm, Absorptionsgrad: 3%, Mittelwert und Wertebereich

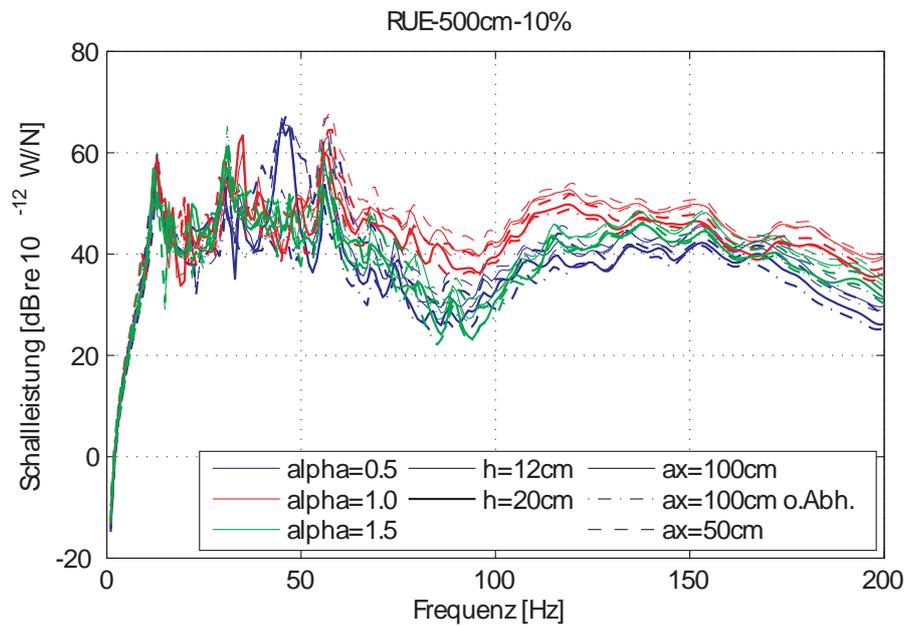


Abbildung A.54: BSD-RUE, Länge  $l = 500$  cm, Absorptionsgrad: 10%

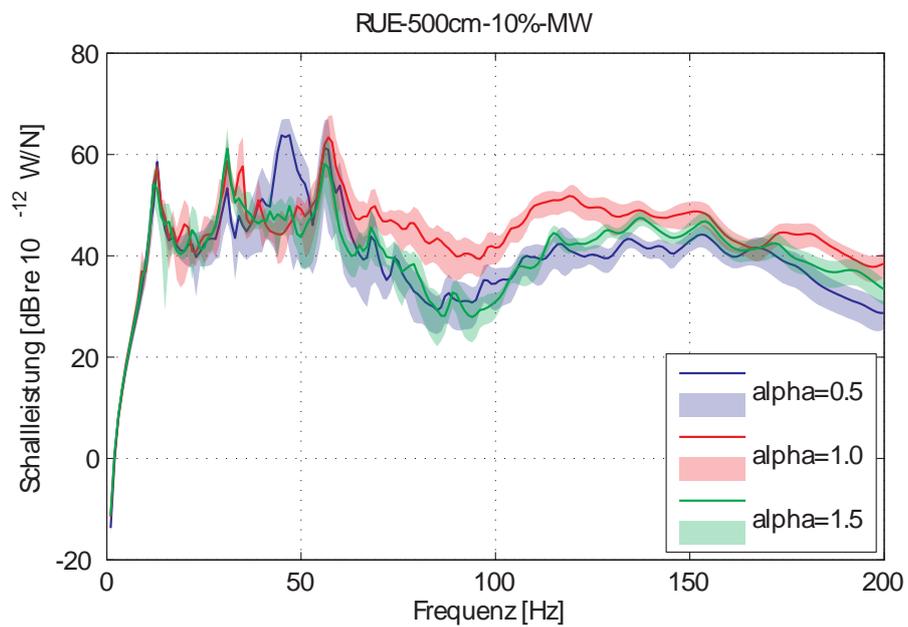


Abbildung A.55: BSD-RUE, Länge  $l = 500$  cm, Absorptionsgrad: 10%, Mittelwert und Wertebereich

## A.2.6 Vergleich unterschiedlicher Längen (Mittelwerte)

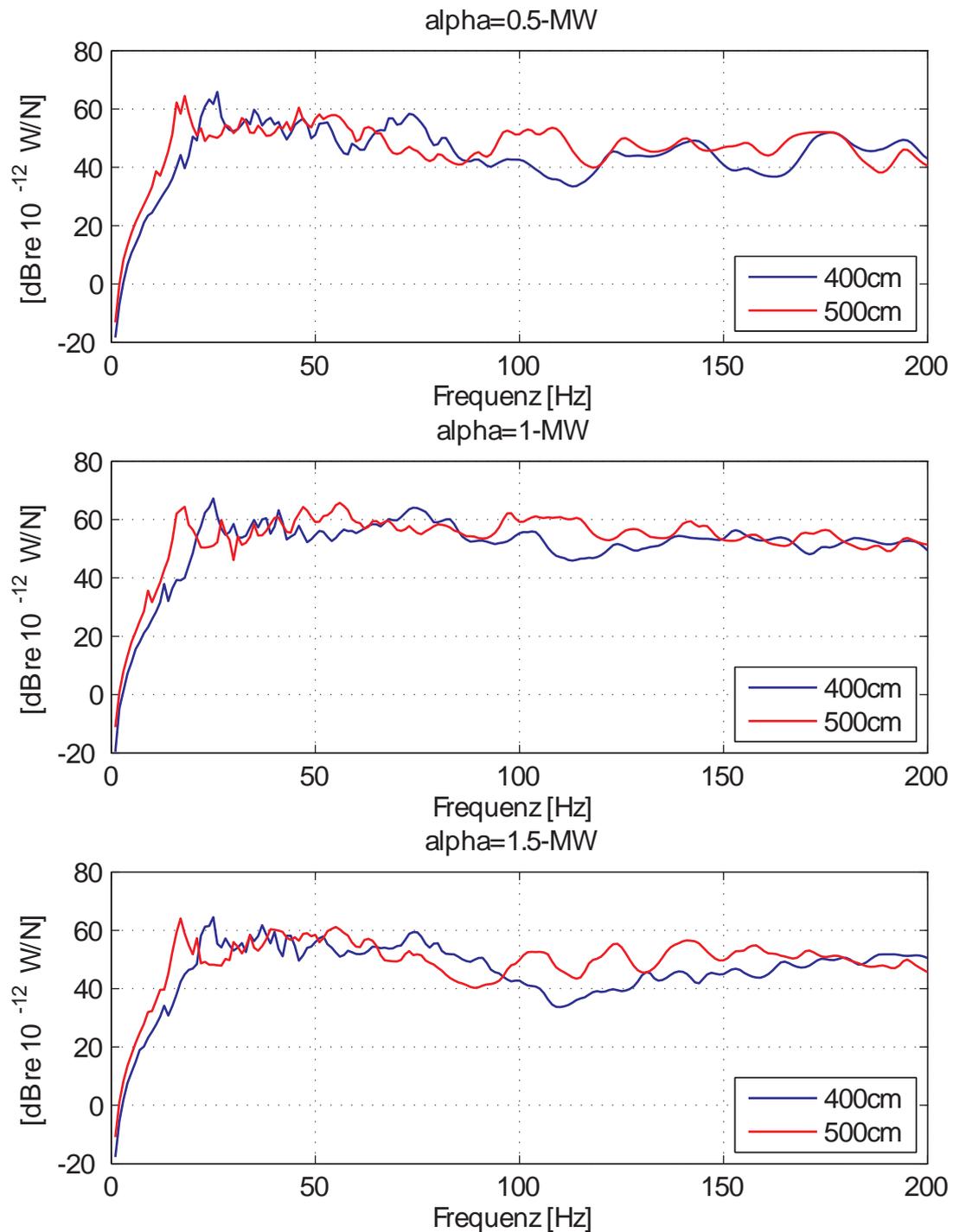
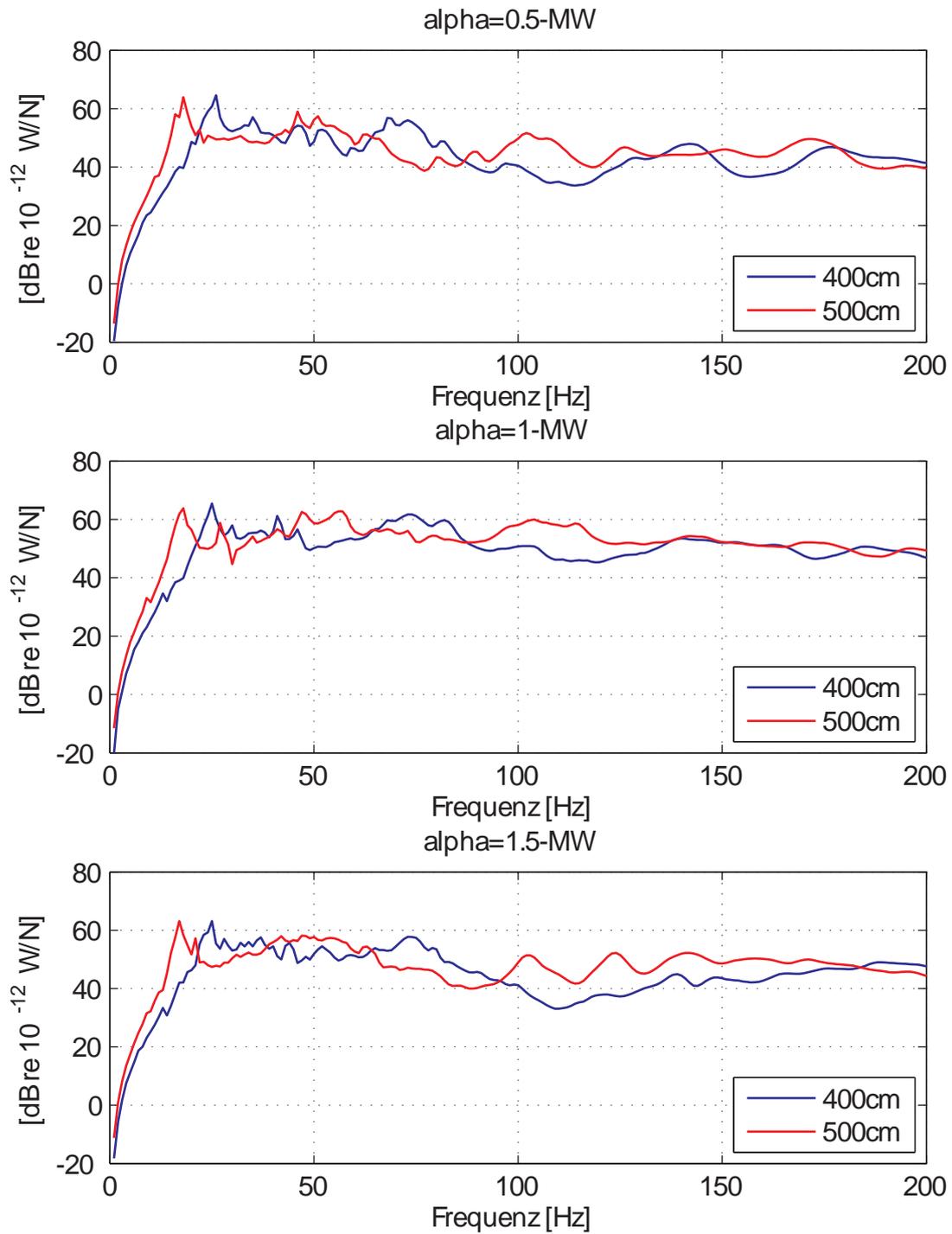


Abbildung A.56: abgestrahlte Schalleistung, BSD-RU, Absorptionsgrad: 3%, Mittelwerte



**Abbildung A.57:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RU, Absorptionsgrad: 10%, Mittelwerte

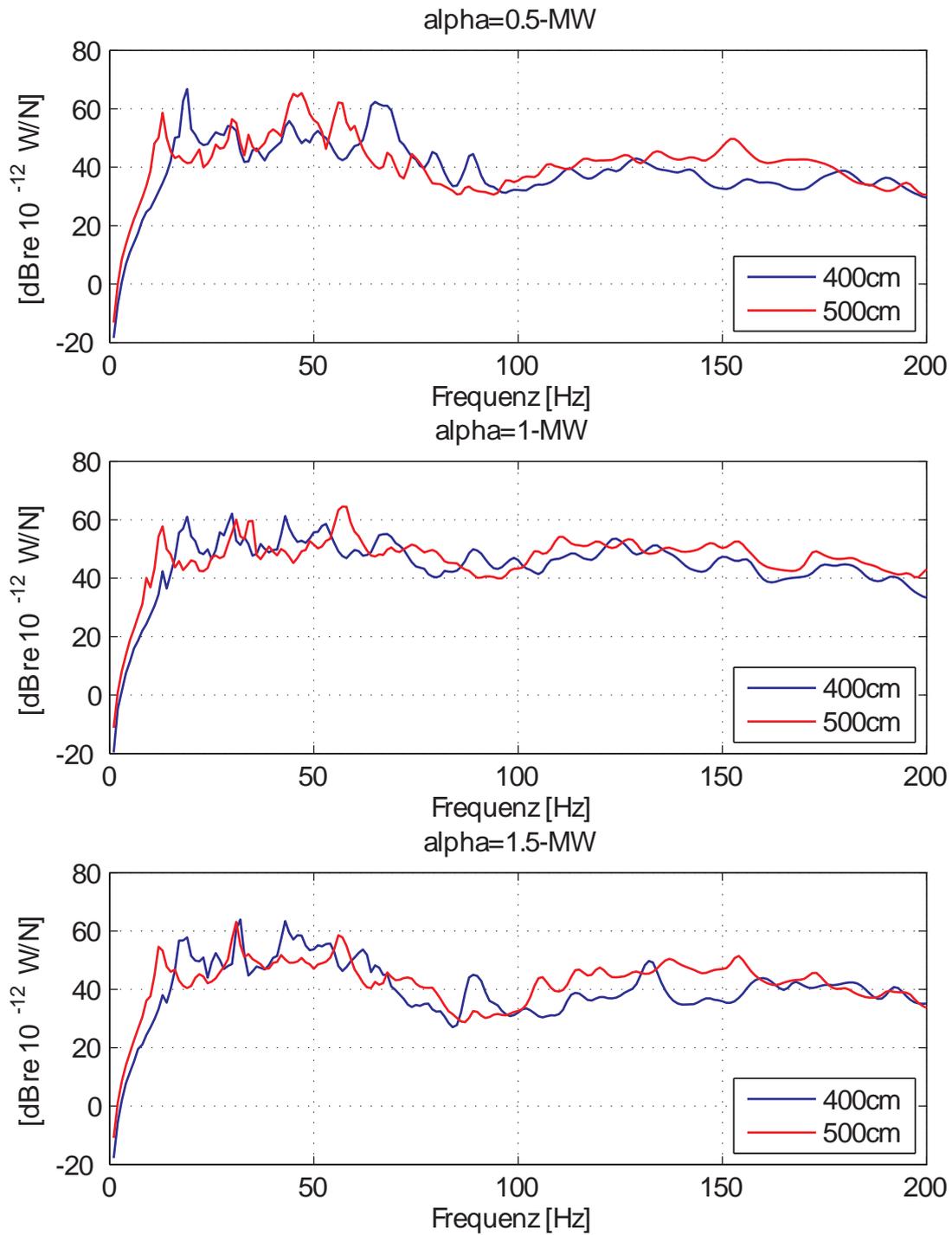
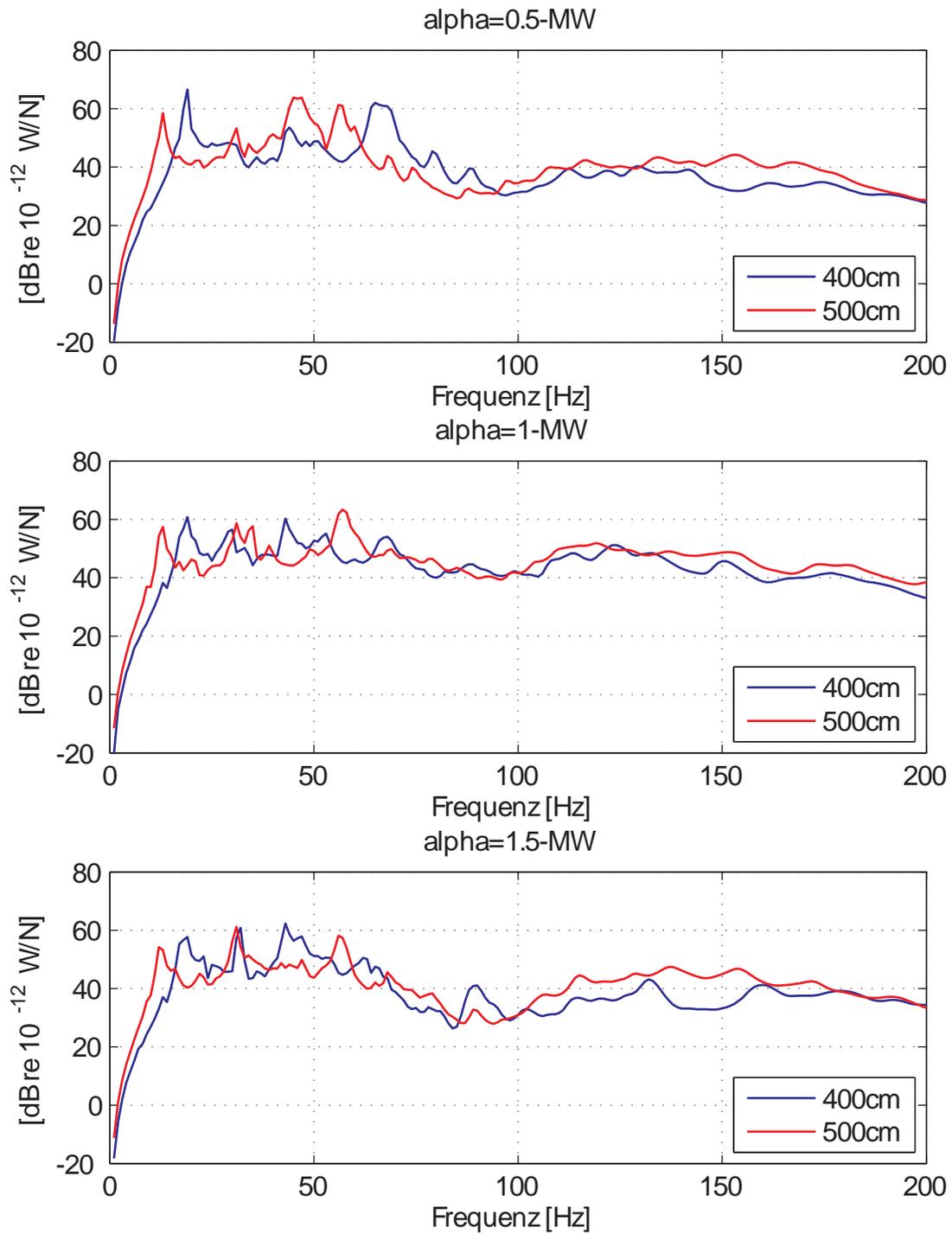


Abbildung A.58: abgestrahlte Schalleistung, BSD-RUE, Absorptionsgrad: 3%, Mittelwerte



**Abbildung A.59:** abgestrahlte Schalleistung, BSD-RUE, Absorptionsgrad: 10%, Mittelwerte

## A.2.7 Vergleich mit und ohne Estrich (Mittelwerte)

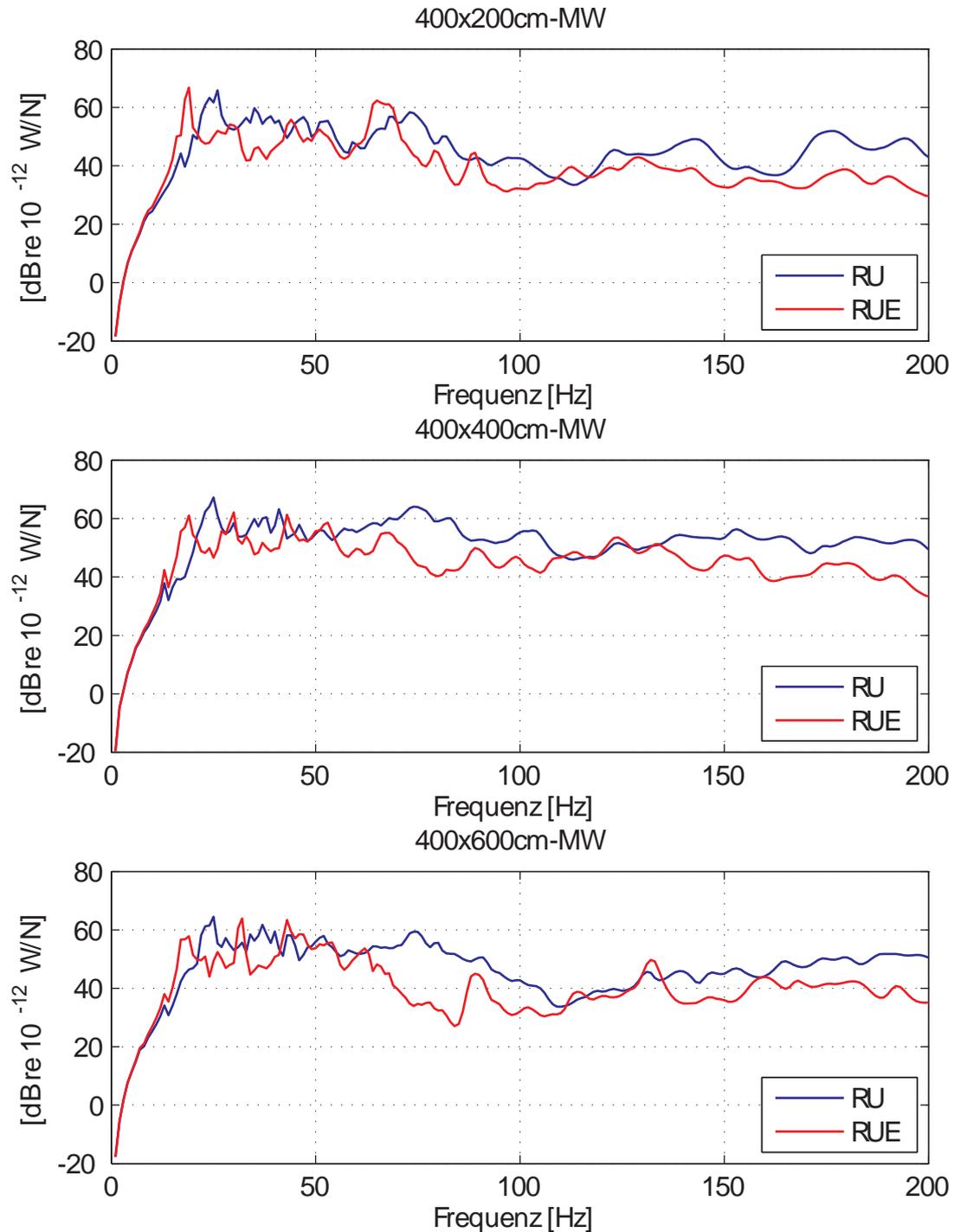
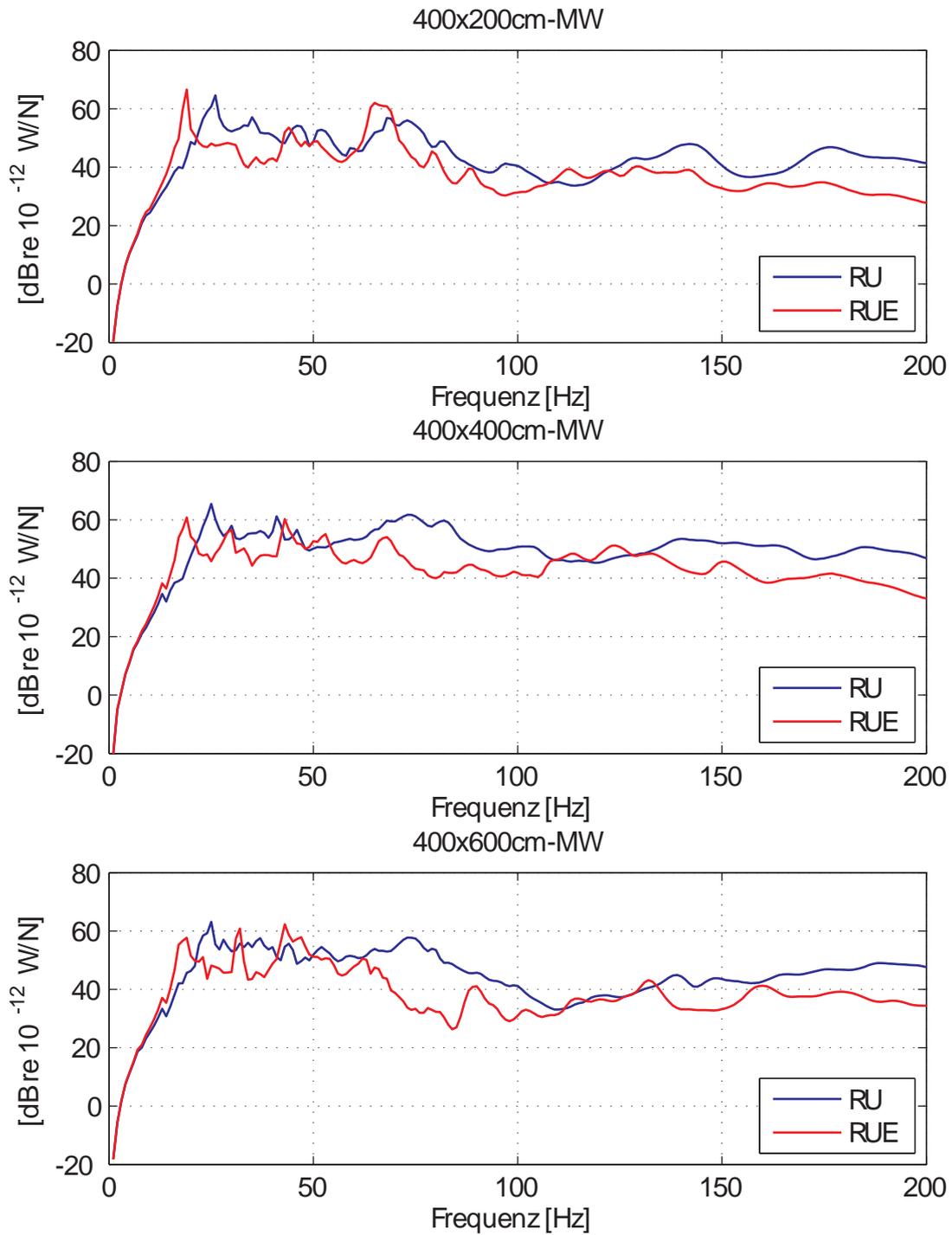


Abbildung A.60: abgestrahlte Schalleistung, BSD, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 3%, Mittelwerte



**Abbildung A.61:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Länge  $l = 400$  cm, Absorptionsgrad: 10%, Mittelwerte

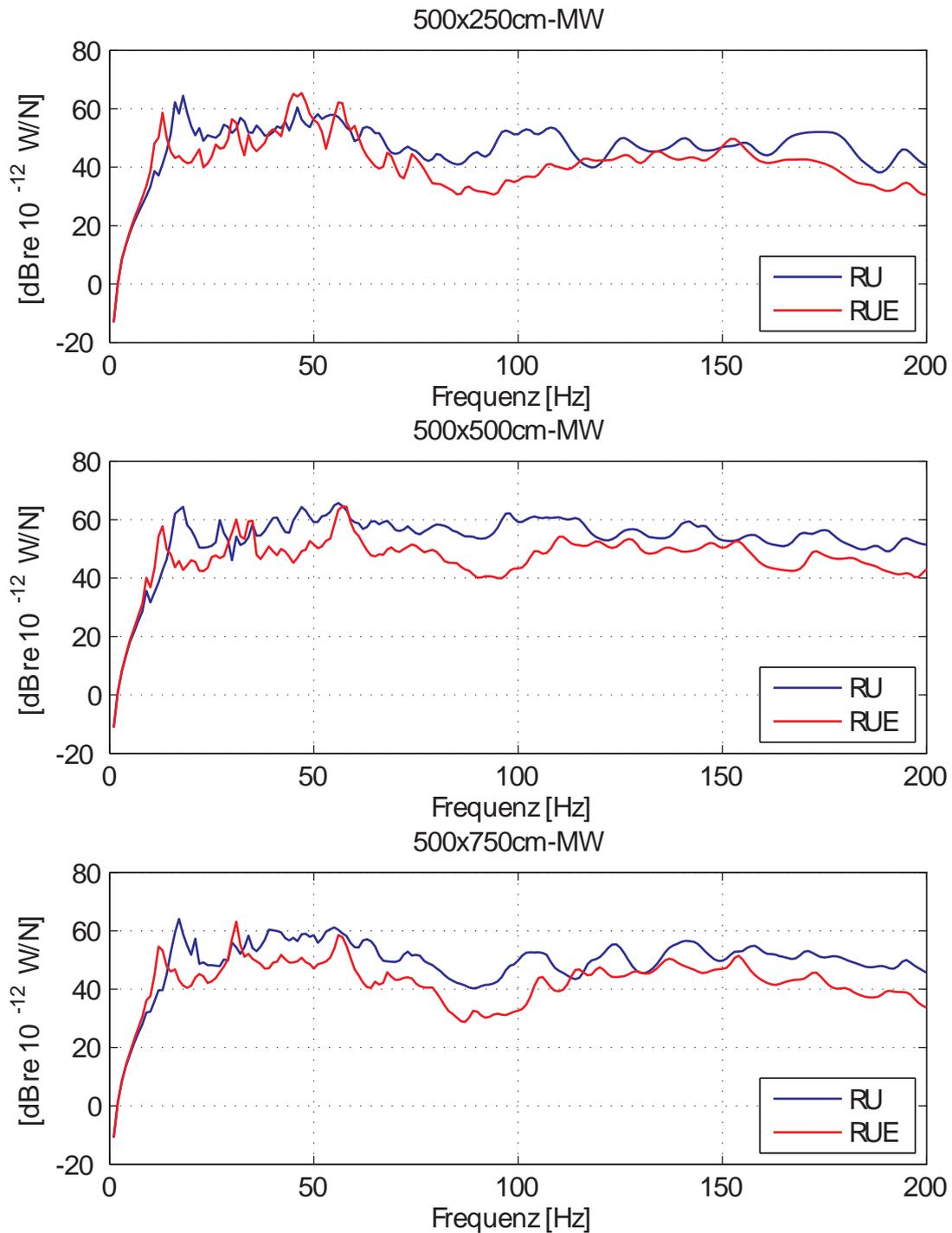
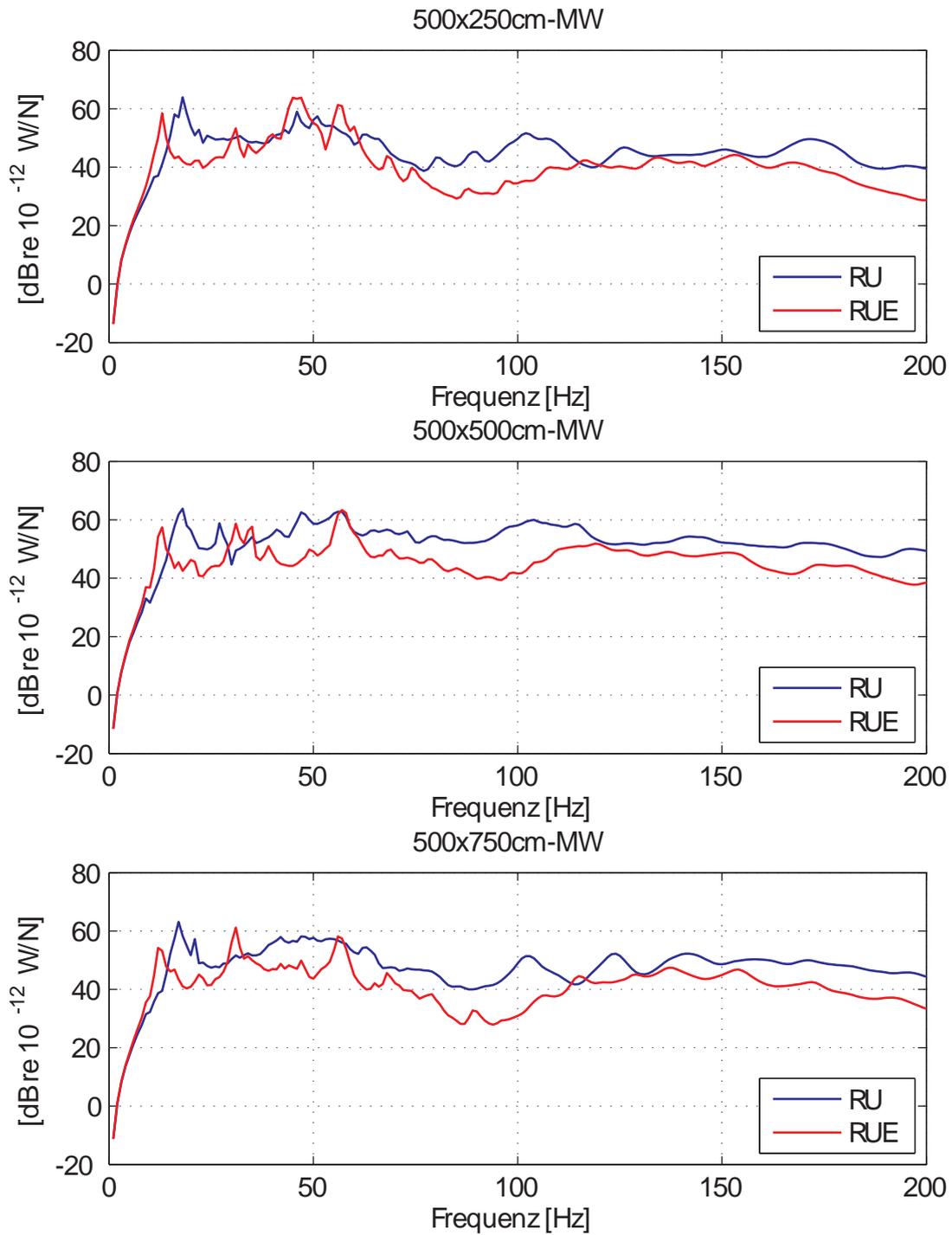


Abbildung A.62: abgestrahlte Schallleistung, BSD, Länge  $l = 500$  cm, Absorptionsgrad: 3%, Mittelwerte



**Abbildung A.63:** abgestrahlte Schalleistung, BSD, Länge  $l = 500$  cm, Absorptionsgrad: 10%, Mittelwerte

## A.2.8 Vergleich von Balkenabständen, Balkenbreiten und Ausbauzuständen

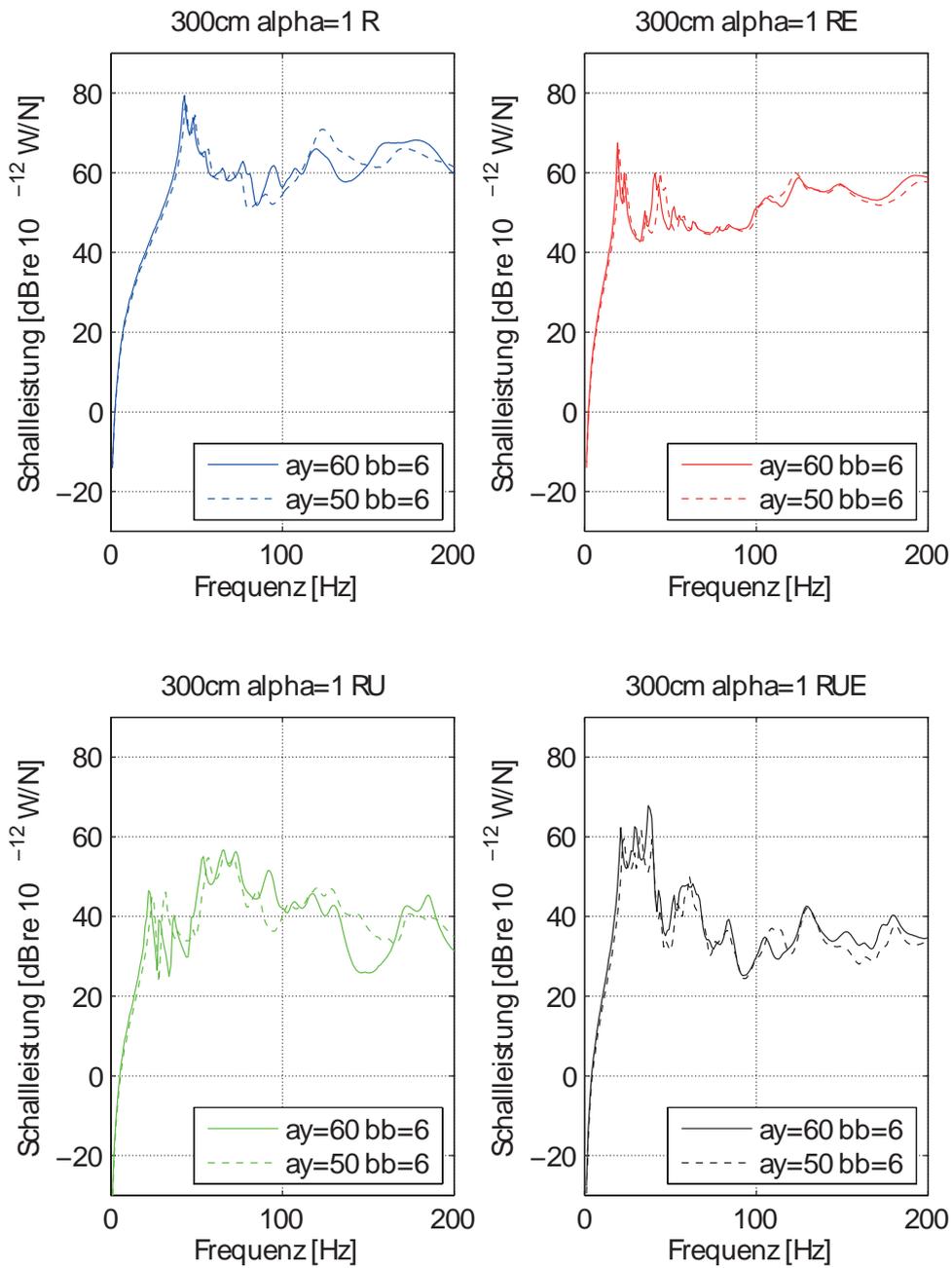
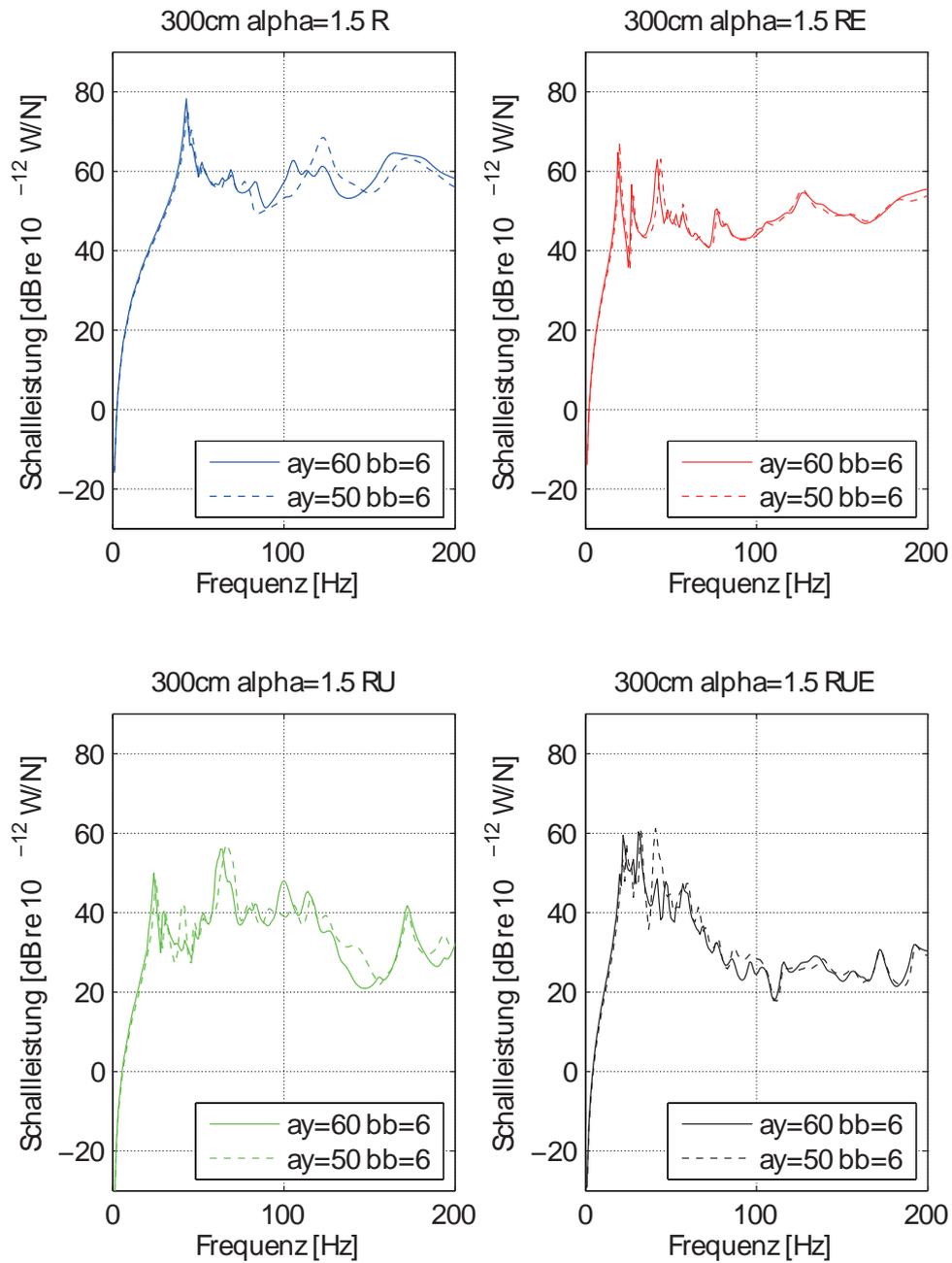
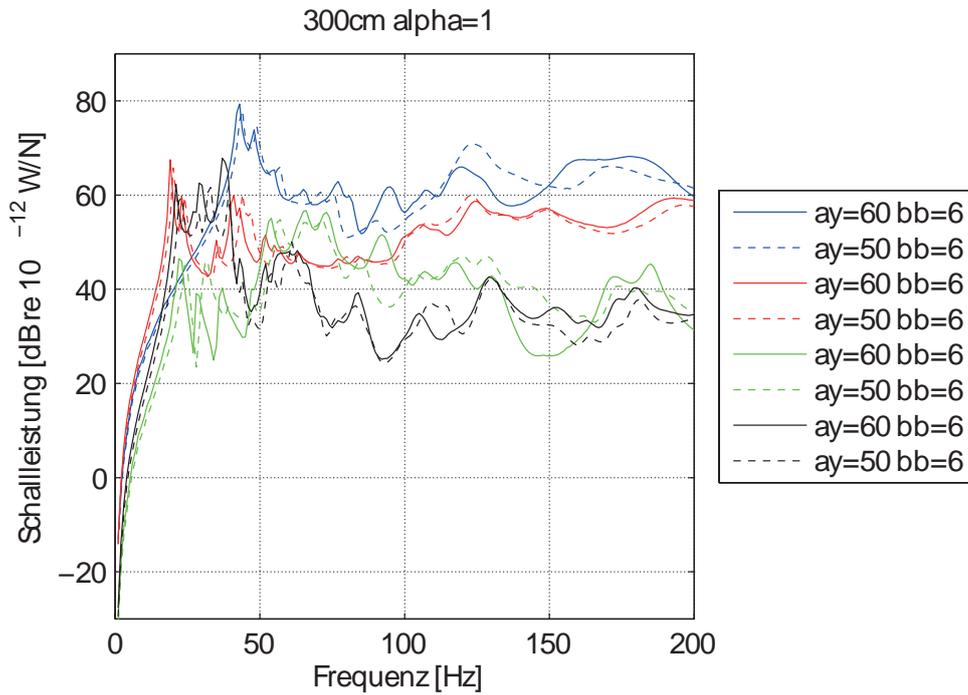


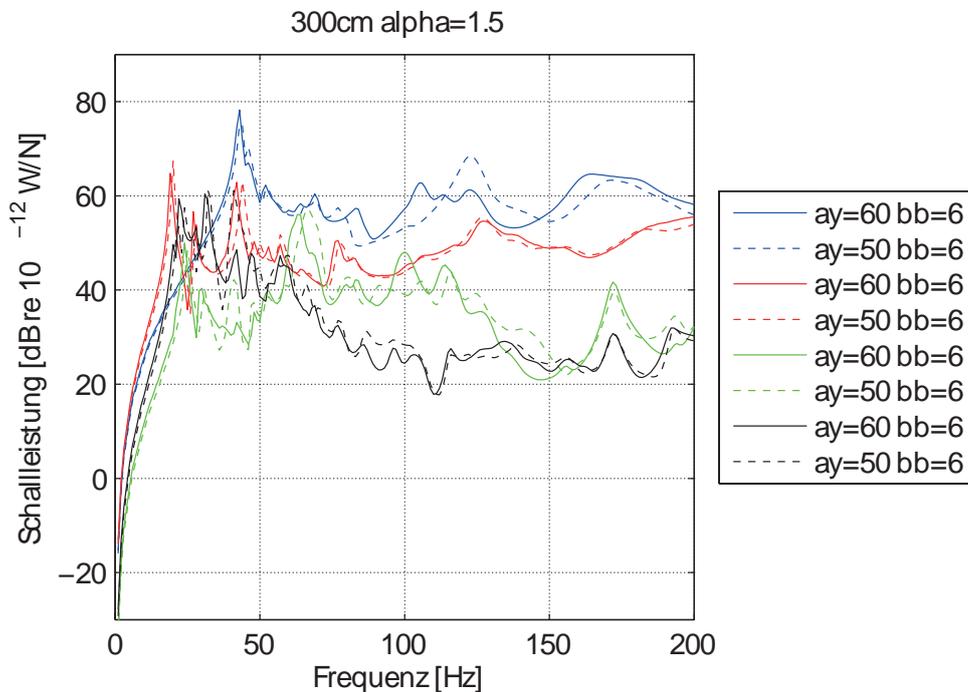
Abbildung A.64: HBD, Länge  $l = 300 \text{ cm}$ ,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



**Abbildung A.65:** HBD, Länge  $l = 300 \text{ cm}$ ,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



**Abbildung A.66:** HBD, Länge  $l = 300$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



**Abbildung A.67:** HBD, Länge  $l = 300$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz

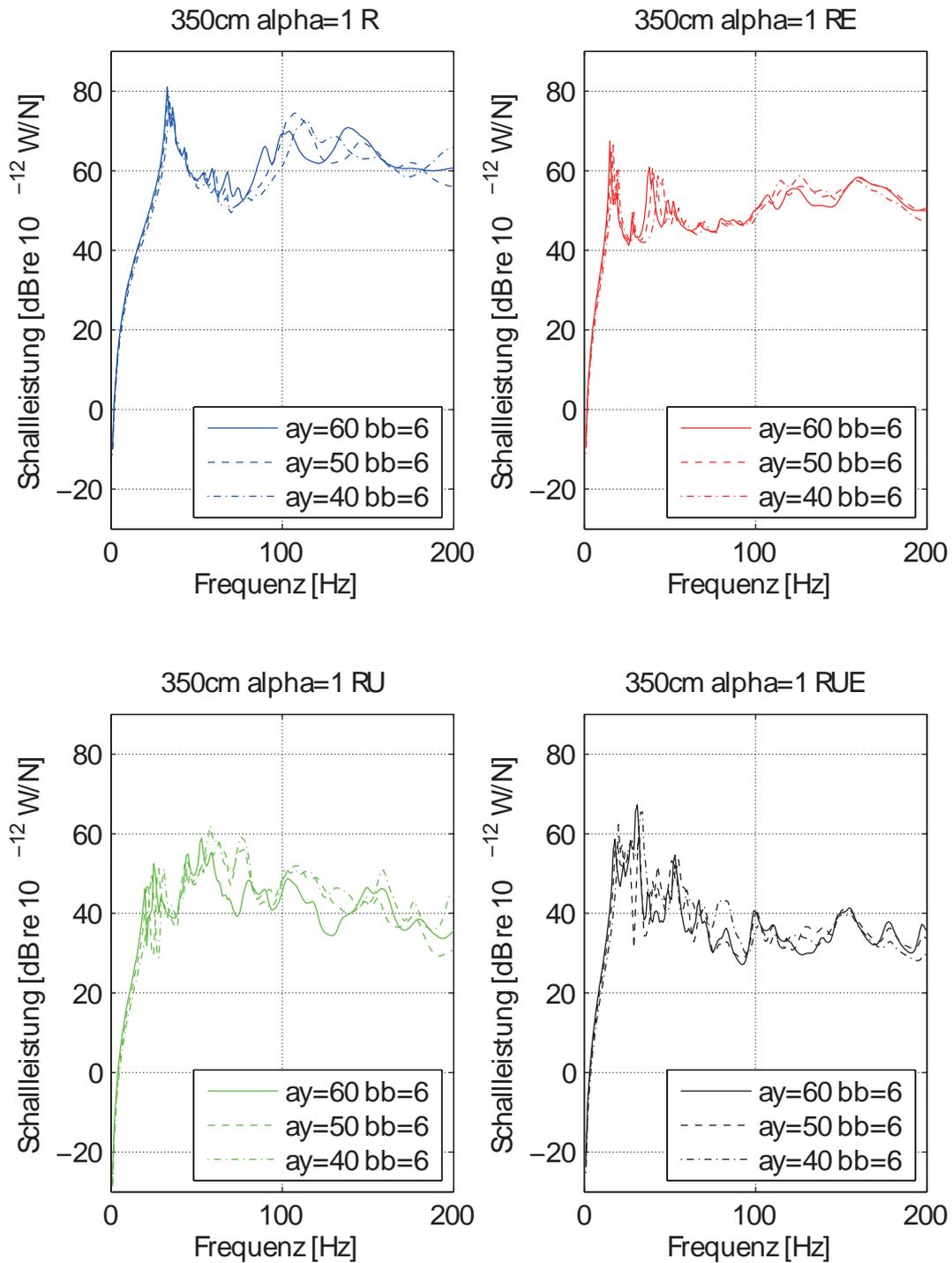


Abbildung A.68: HBD, Länge  $l = 350 \text{ cm}$ ,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm

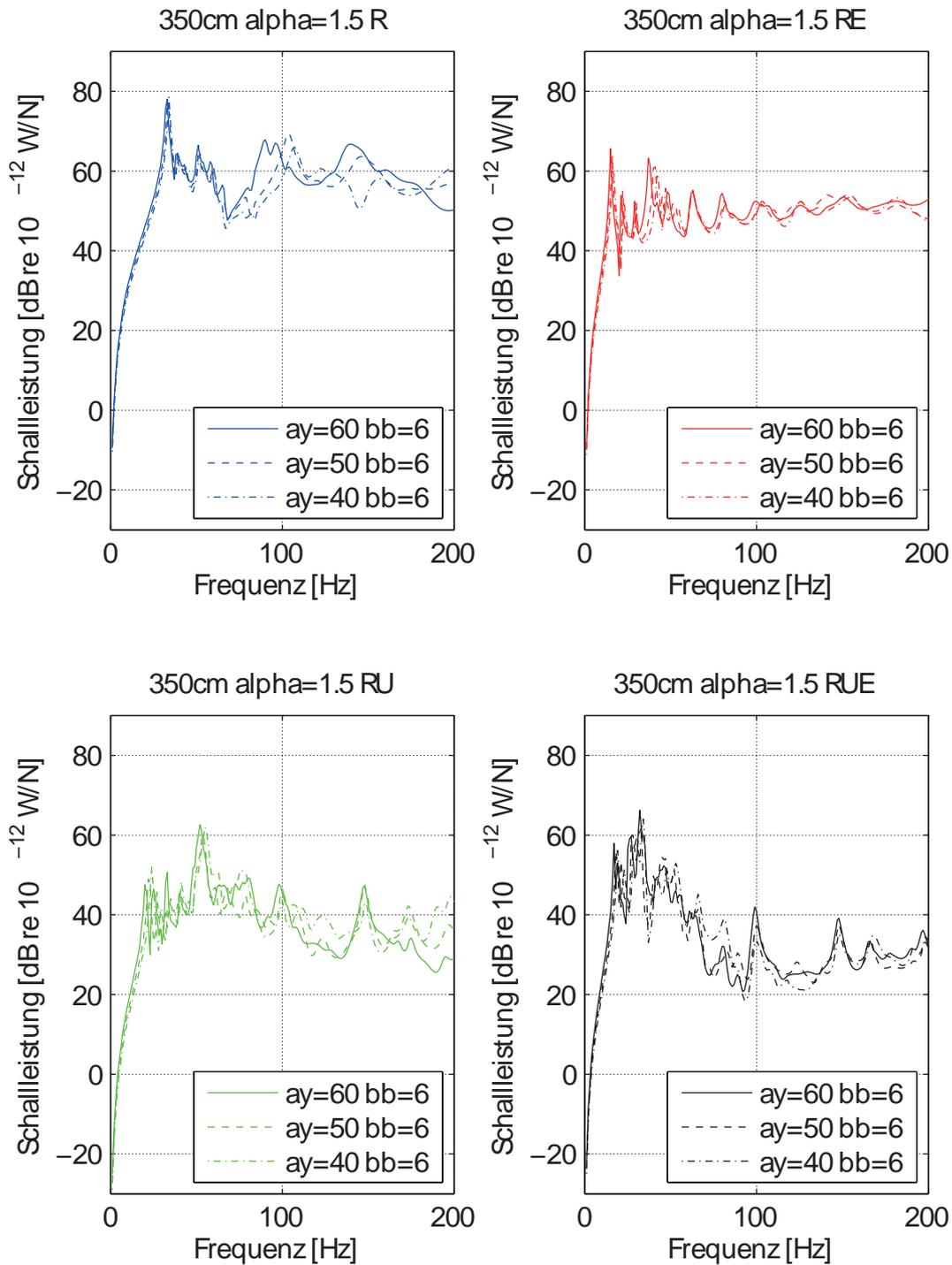
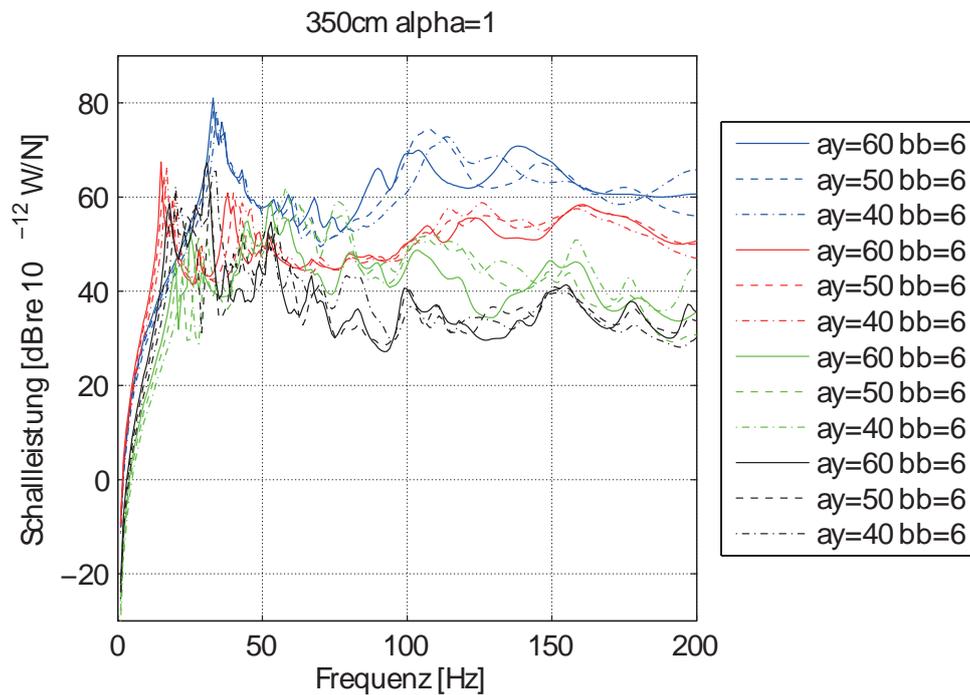
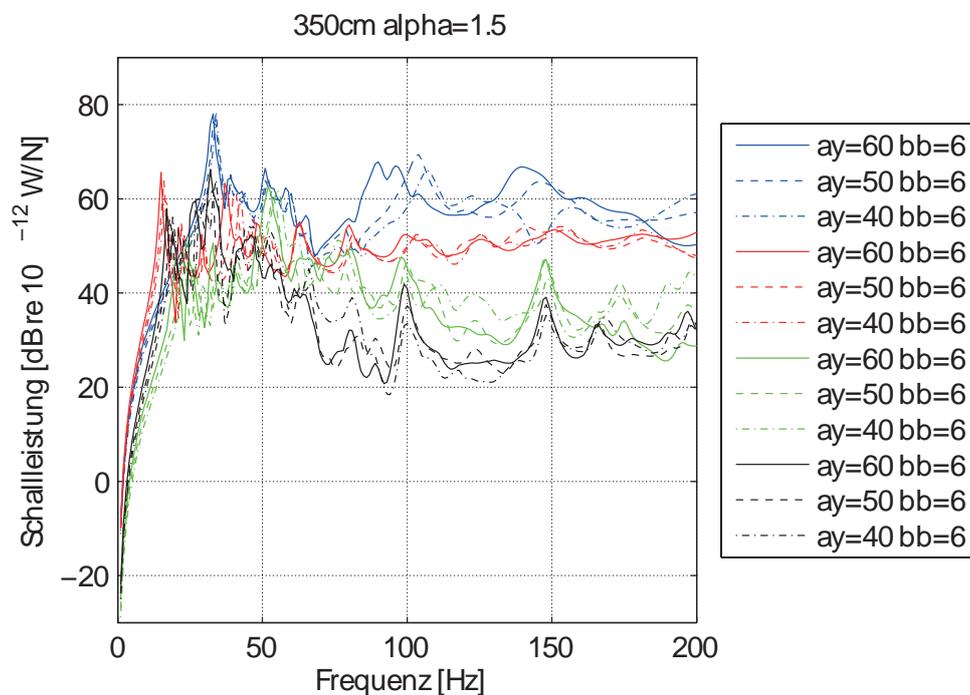


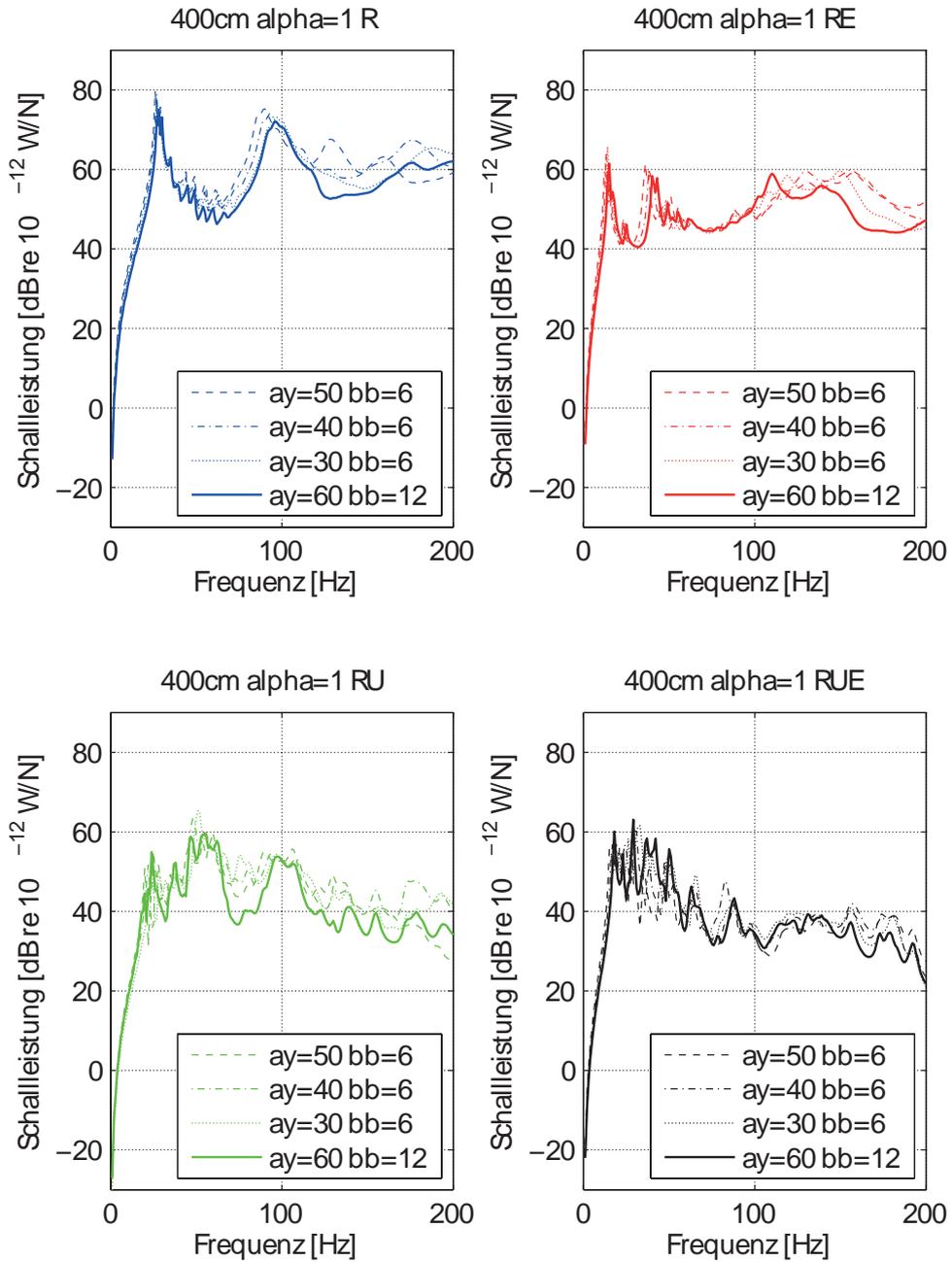
Abbildung A.69: HBD, Länge  $l = 350 \text{ cm}$ ,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



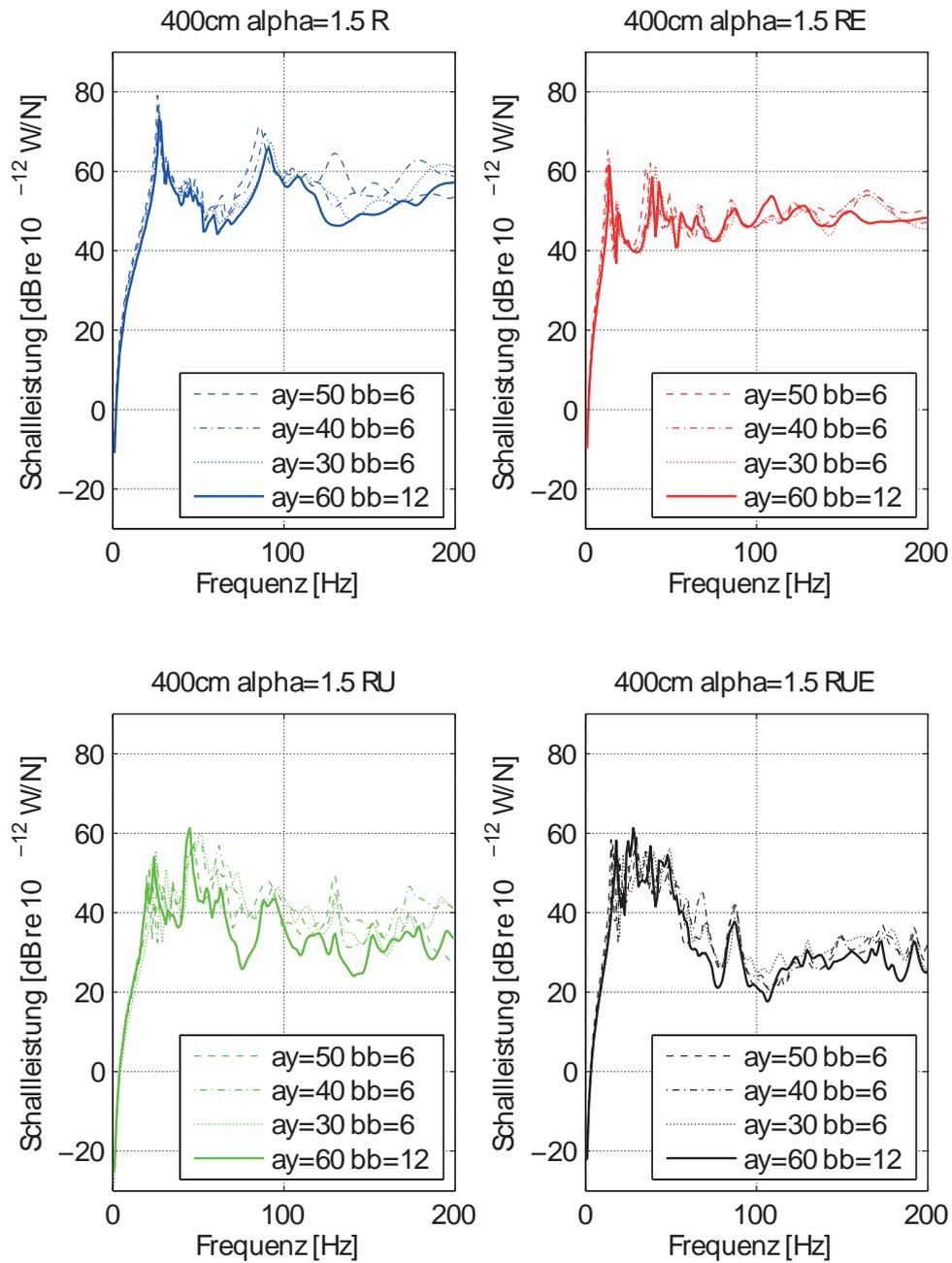
**Abbildung A.70:** HBD, Länge  $l = 350$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $a_y$  in cm und Balkenbreite  $b_b$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



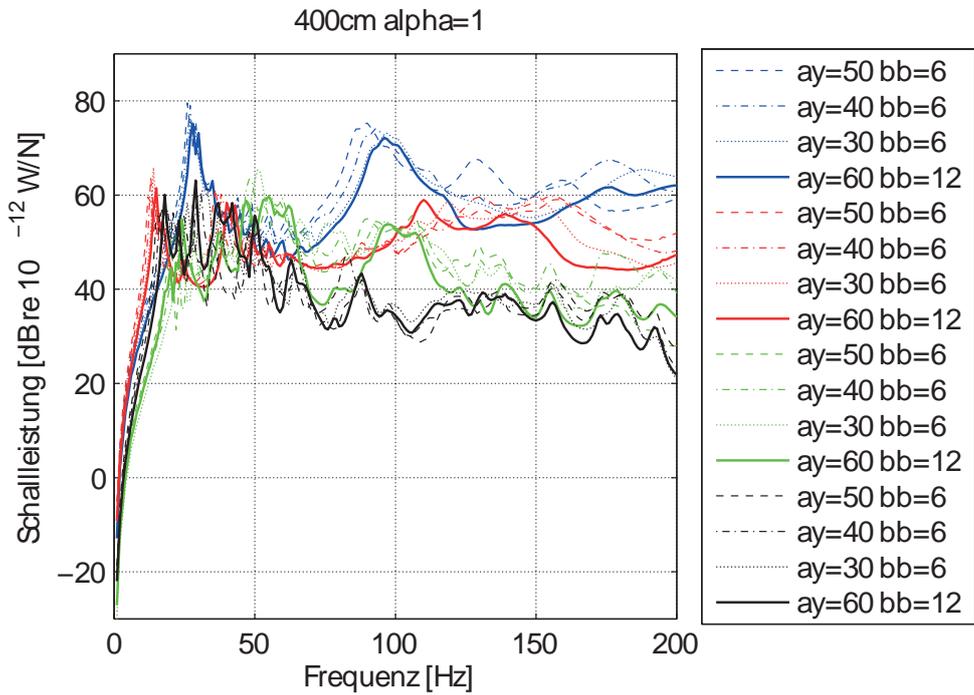
**Abbildung A.71:** HBD, Länge  $l = 350$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $a_y$  in cm und Balkenbreite  $b_b$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



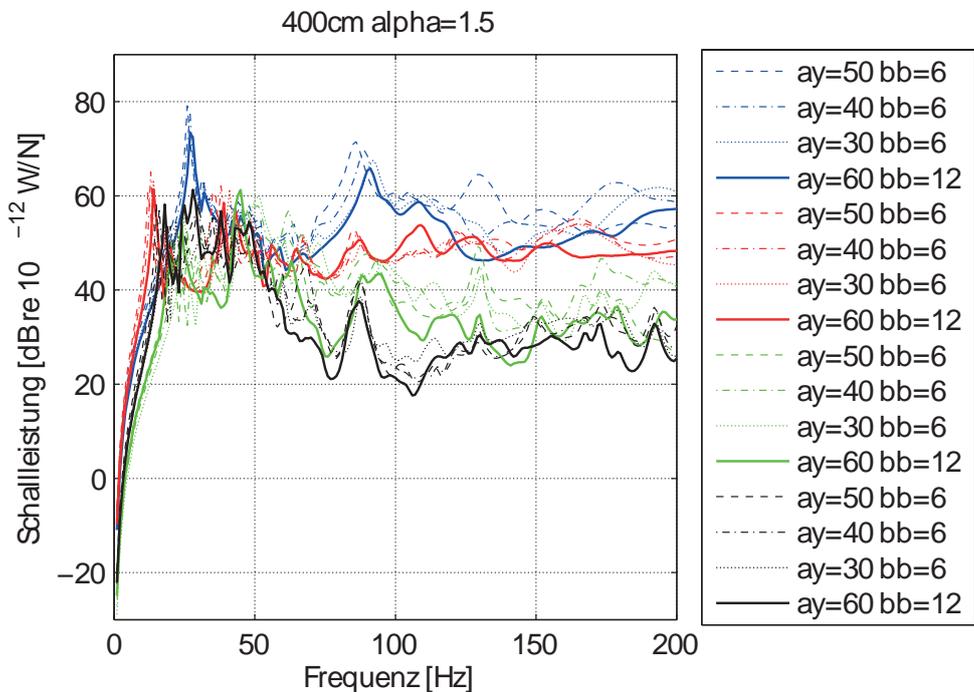
**Abbildung A.72:** HBD, Länge  $l = 400$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



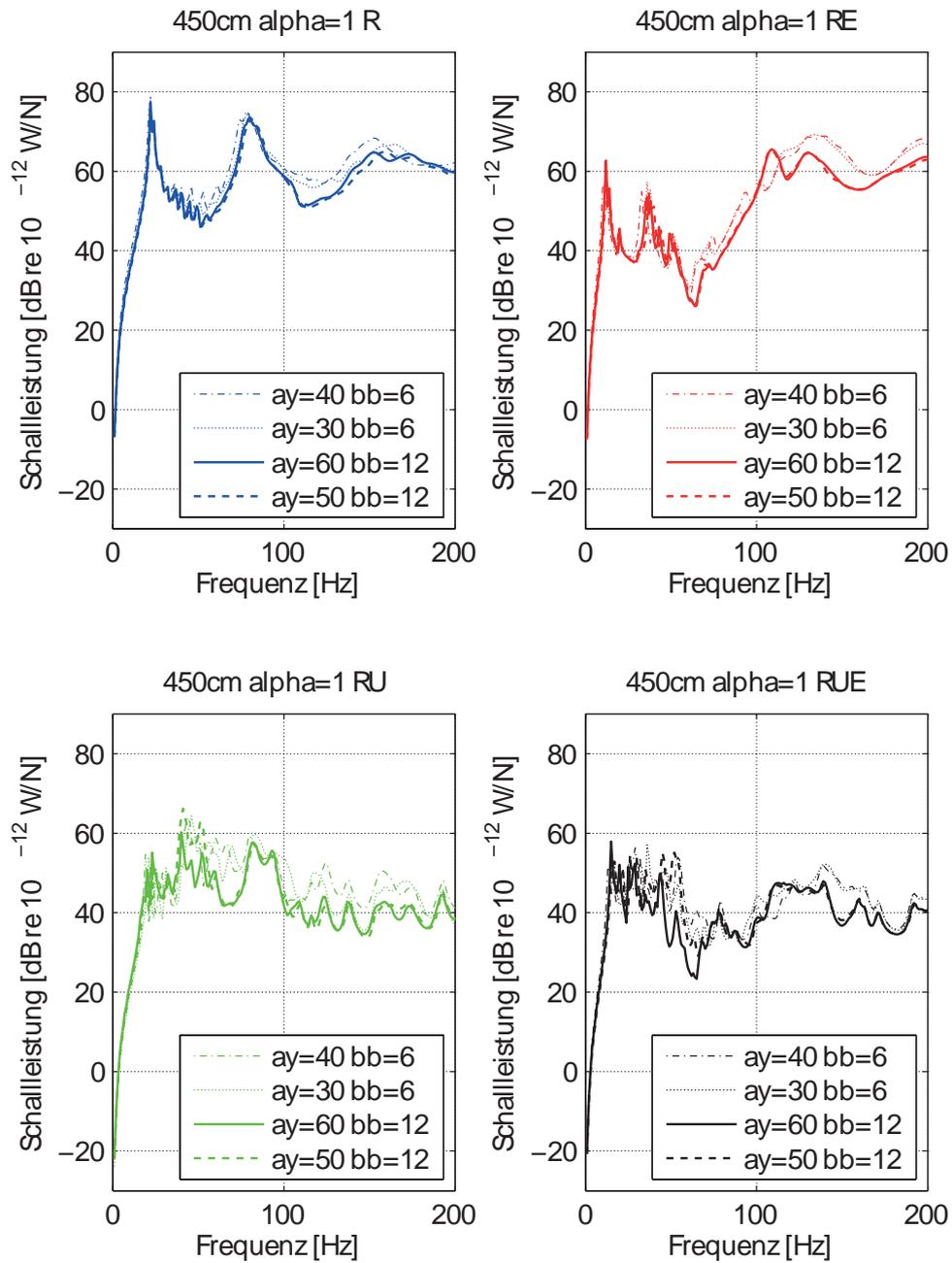
**Abbildung A.73:** HBD, Länge  $l = 400$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



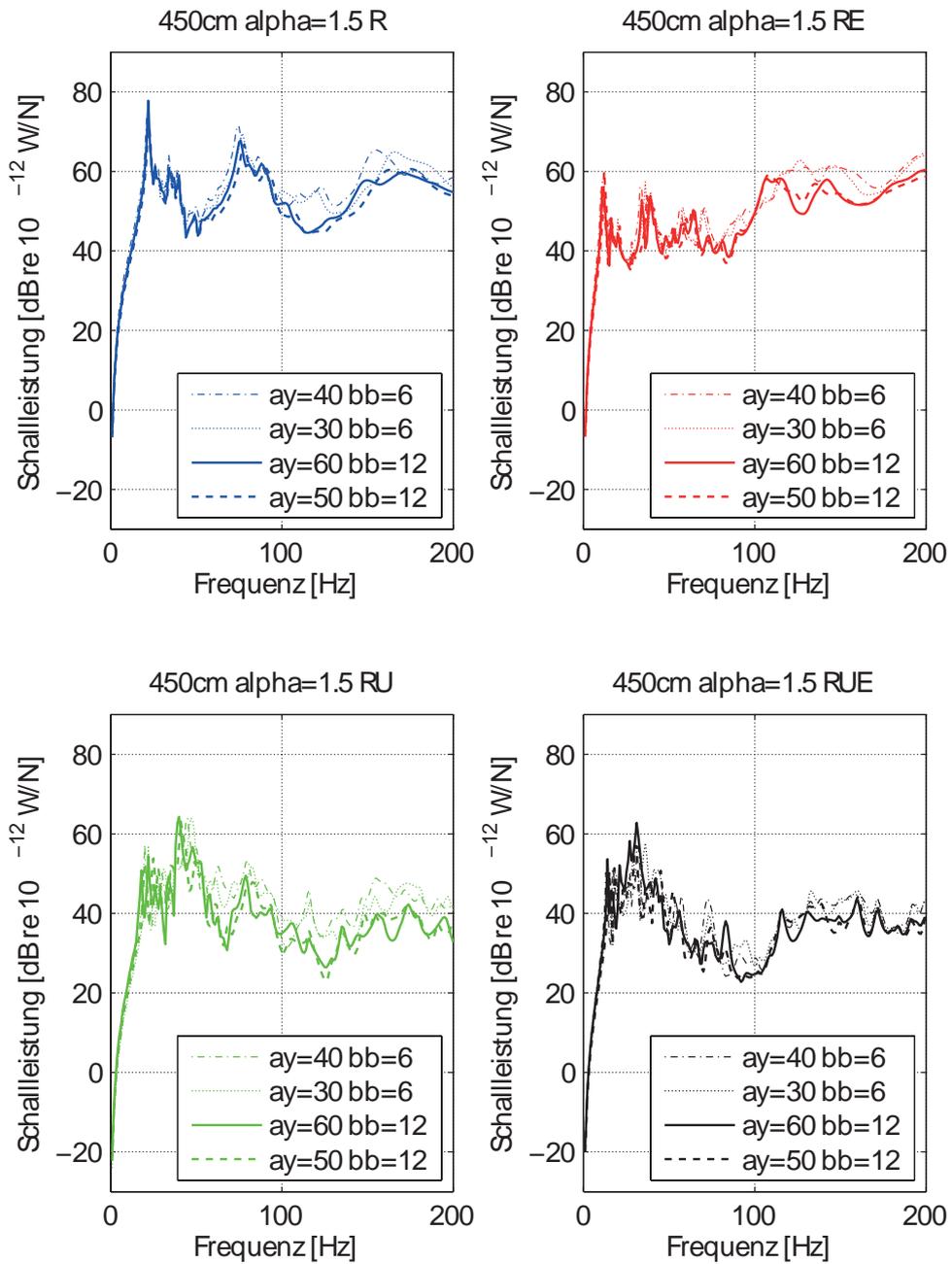
**Abbildung A.74:** HBD, Länge  $l = 400$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



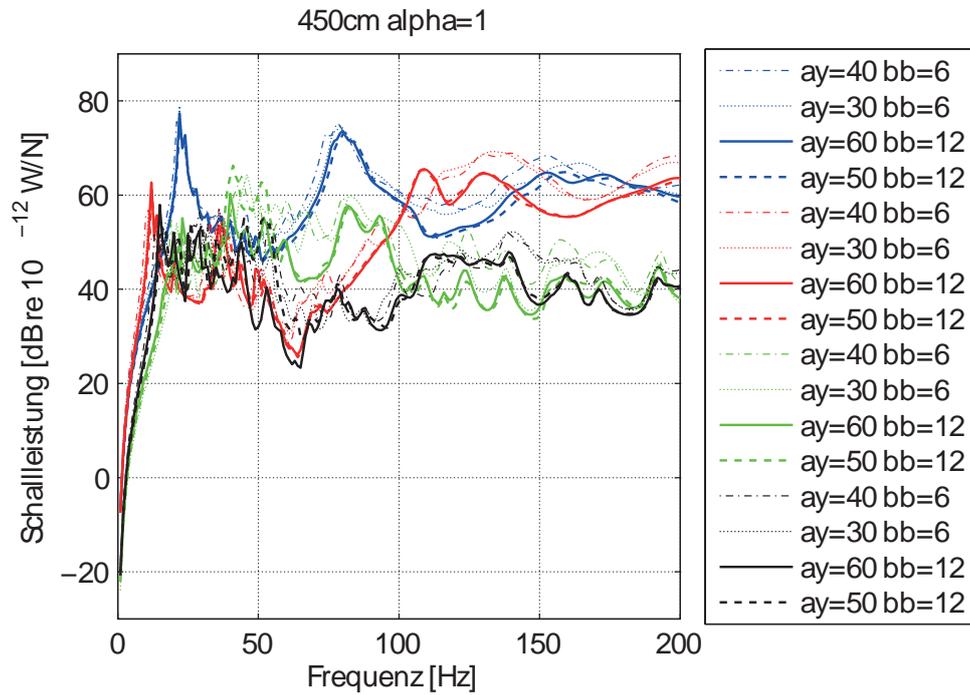
**Abbildung A.75:** HBD, Länge  $l = 400$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



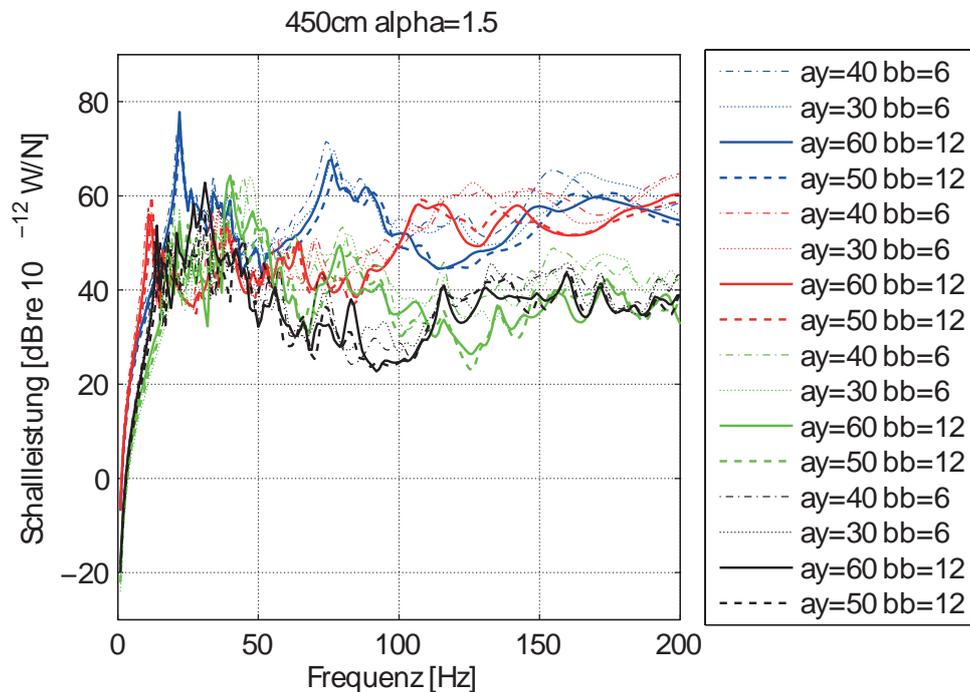
**Abbildung A.76:** HBD, Länge  $l = 450$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



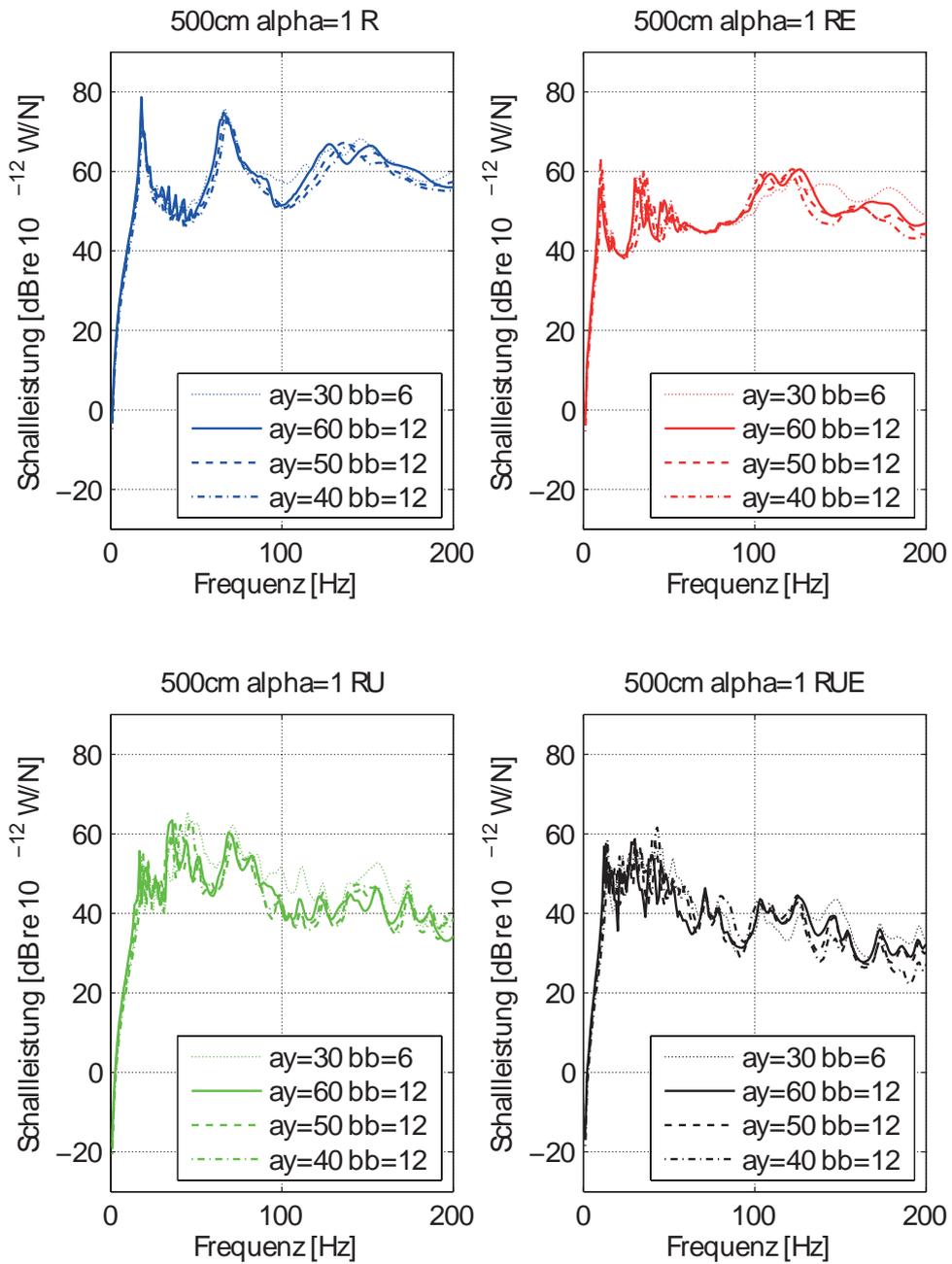
**Abbildung A.77:** HBD, Länge  $l = 450$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



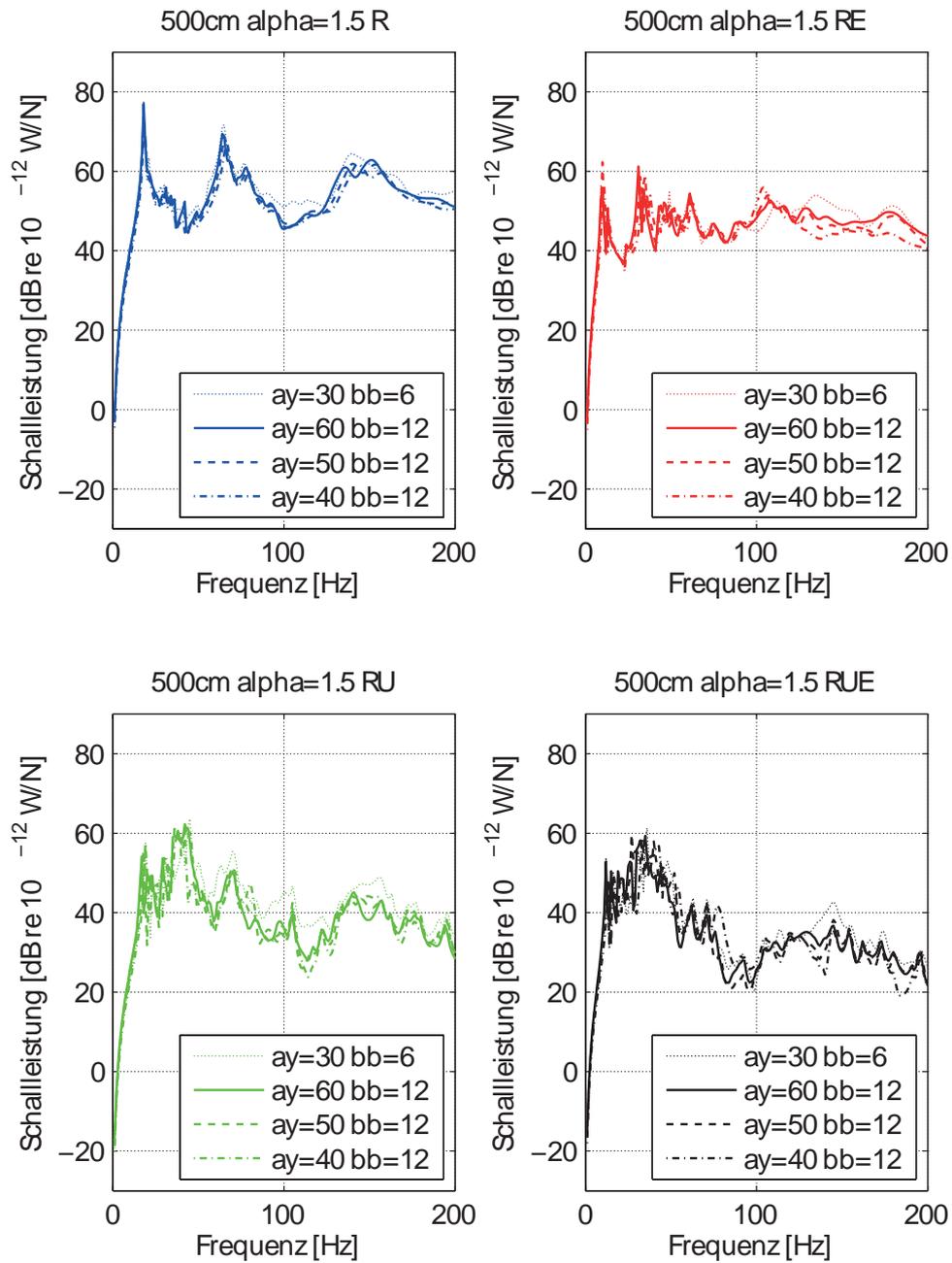
**Abbildung A.78:** HBD, Länge  $l = 450$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $a_y$  in cm und Balkenbreite  $b_b$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



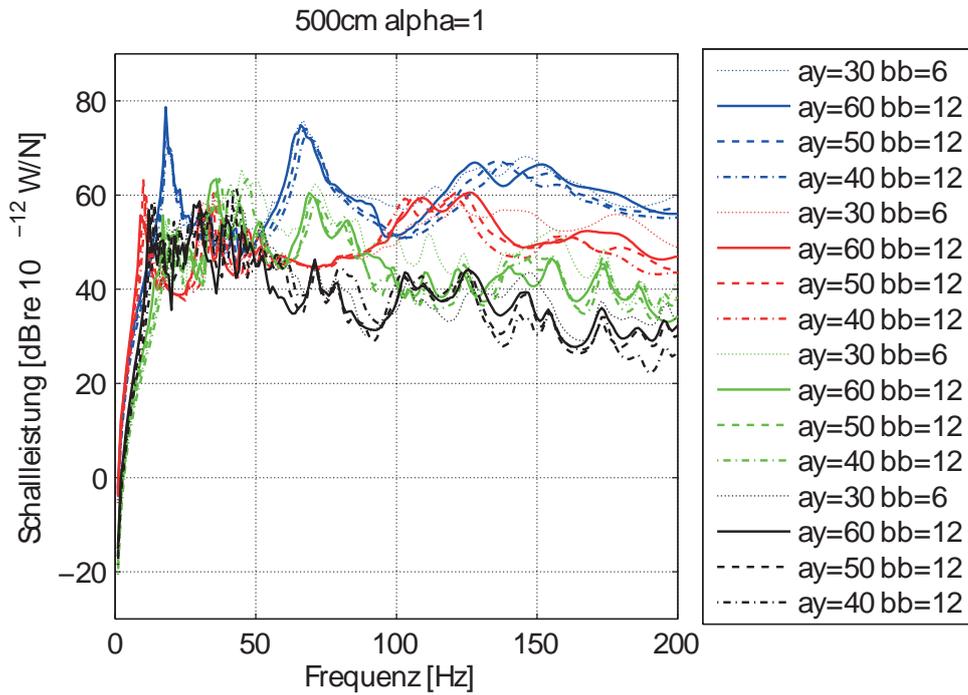
**Abbildung A.79:** HBD, Länge  $l = 450$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $a_y$  in cm und Balkenbreite  $b_b$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



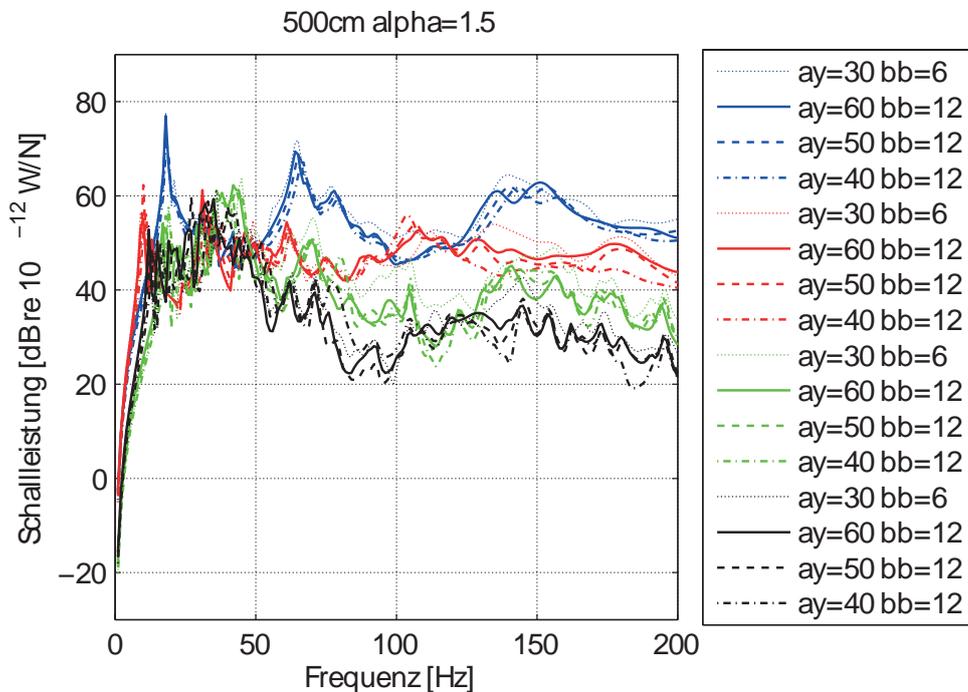
**Abbildung A.80:** HBD, Länge  $l = 500$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



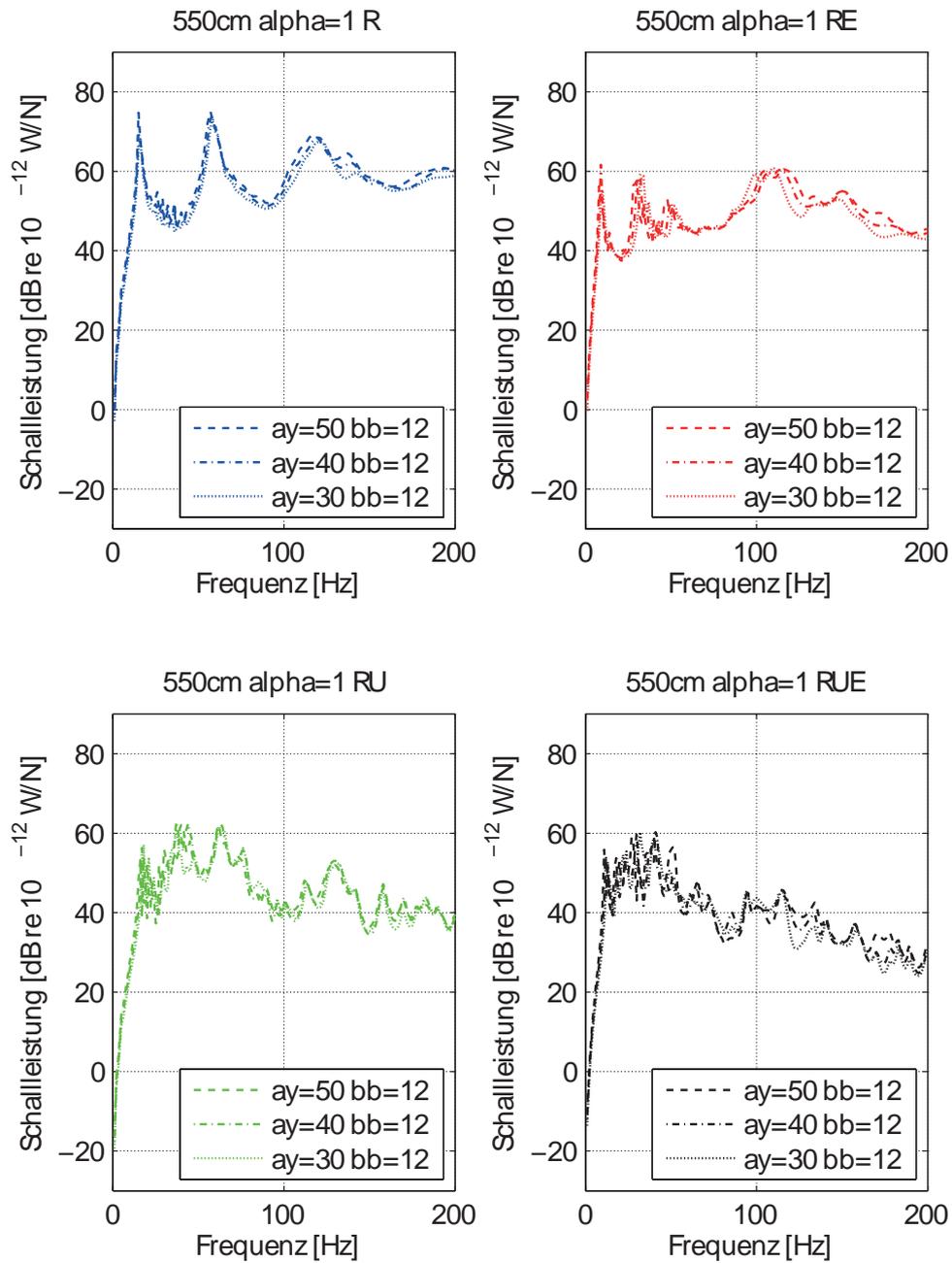
**Abbildung A.81:** HBD, Länge  $l = 500$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



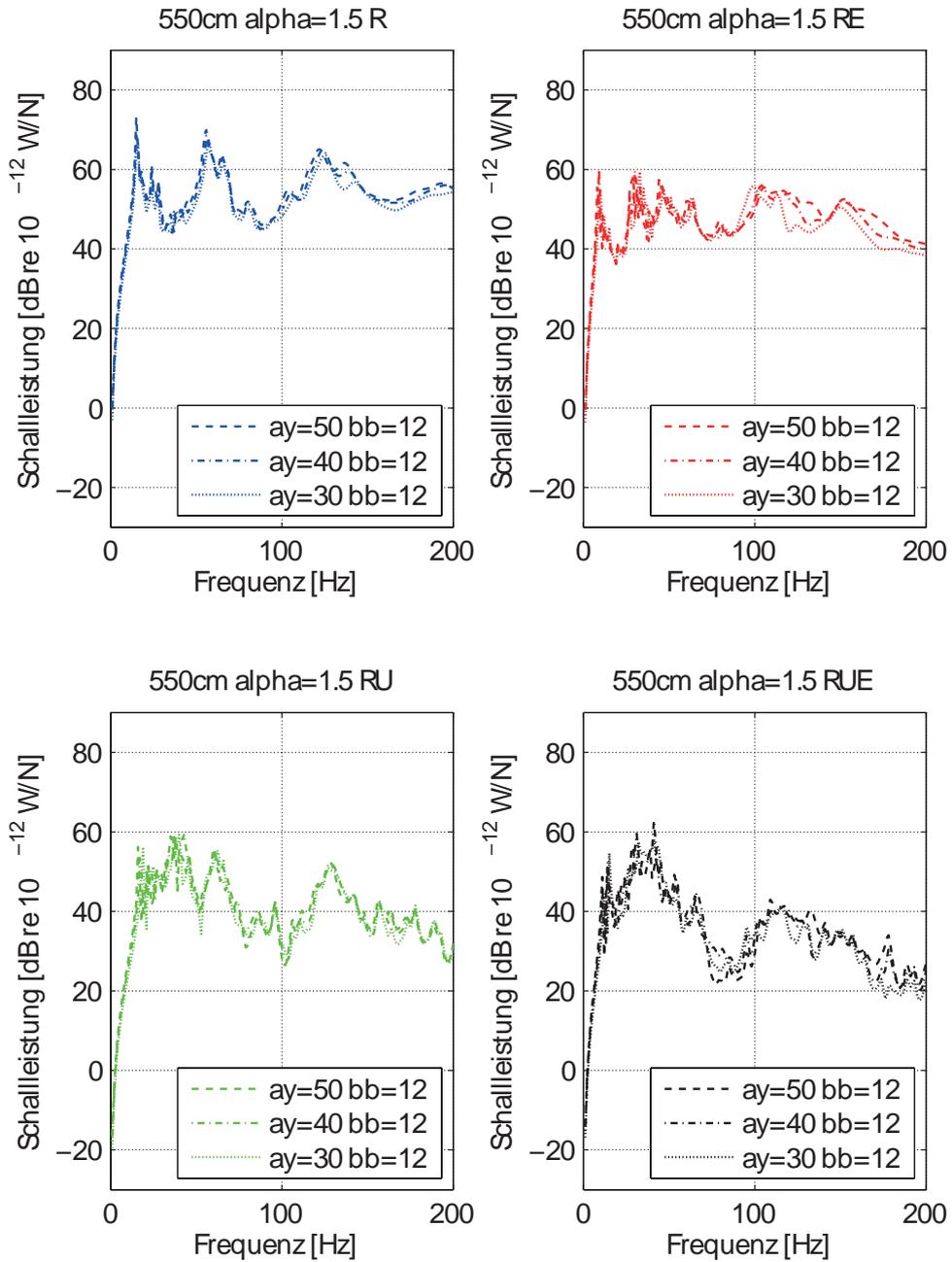
**Abbildung A.82:** HBD, Länge  $l = 500$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



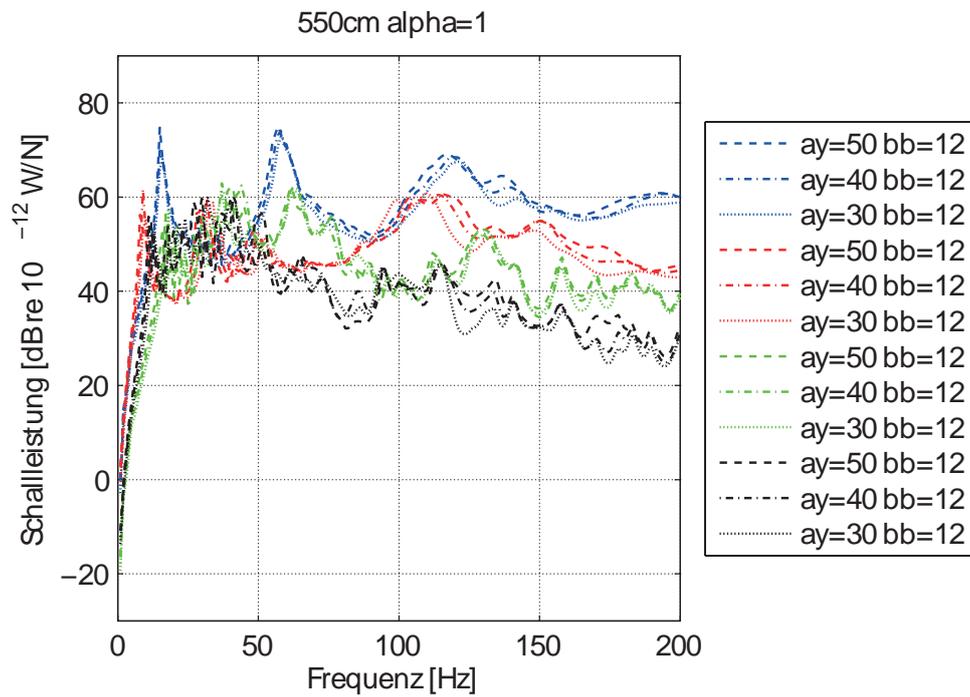
**Abbildung A.83:** HBD, Länge  $l = 500$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



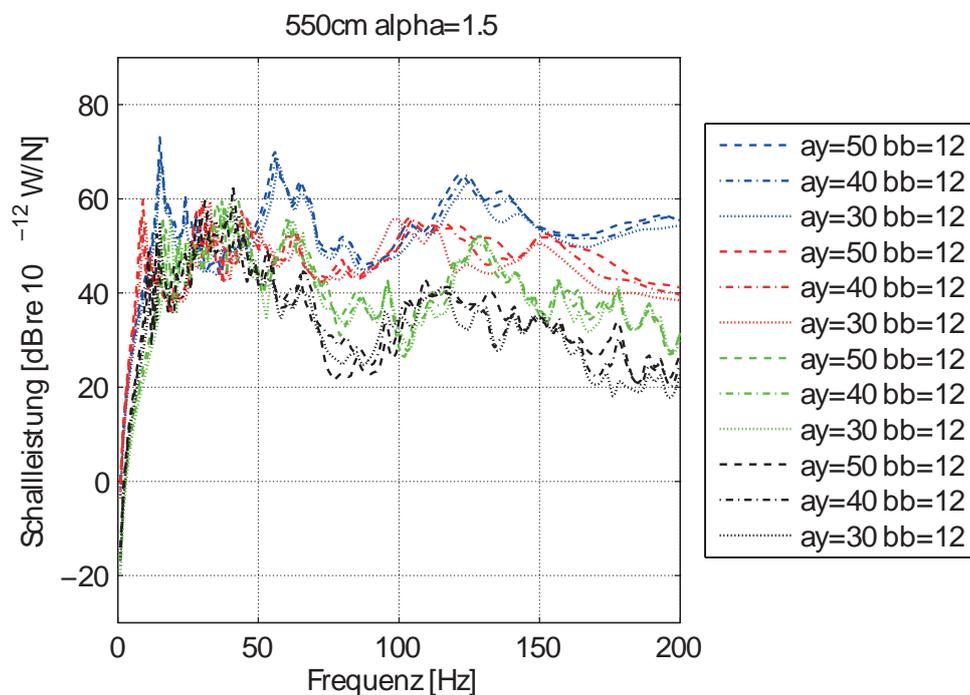
**Abbildung A.84:** HBD, Länge  $l = 550$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



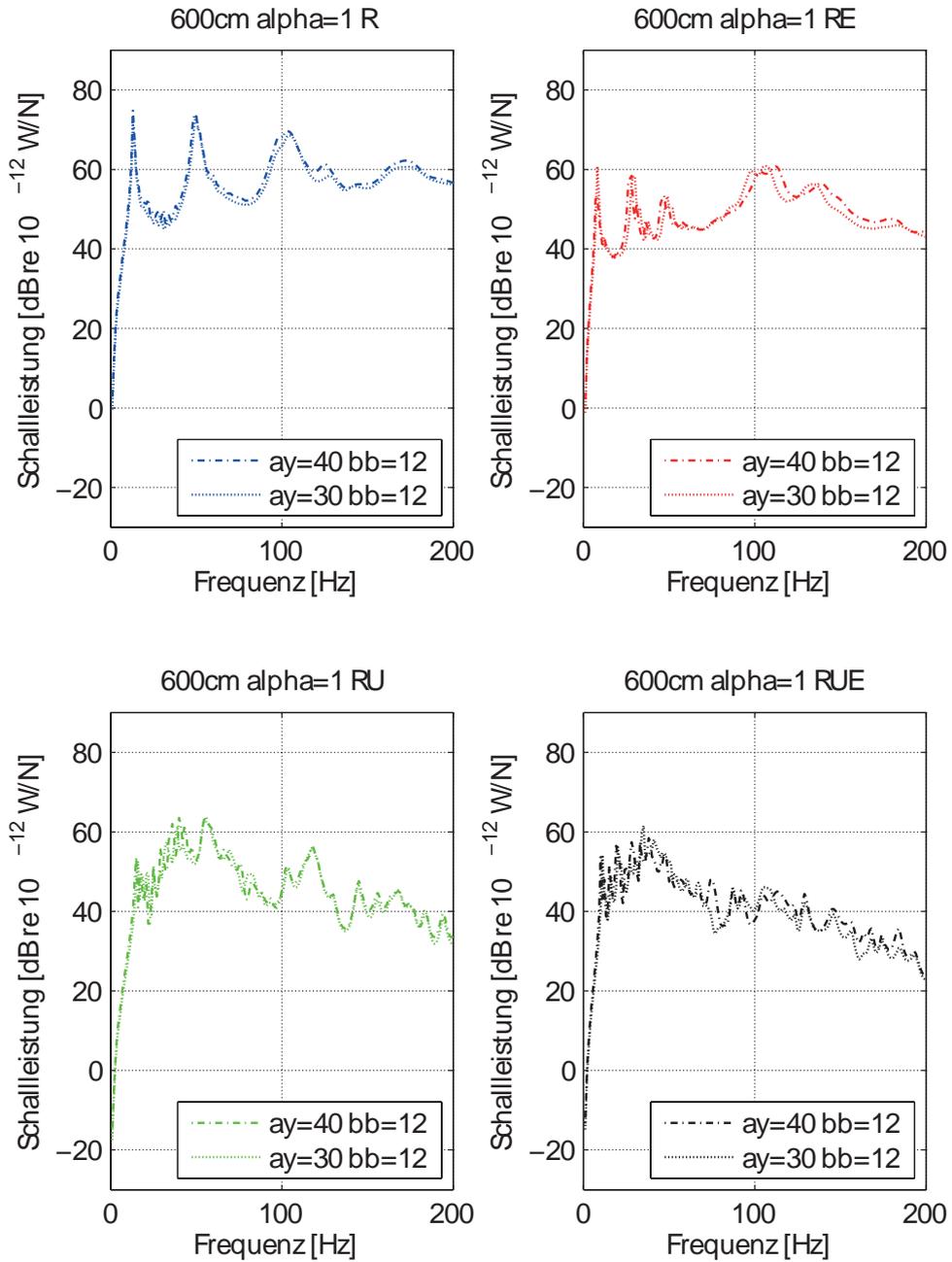
**Abbildung A.85:** HBD, Länge  $l = 550$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



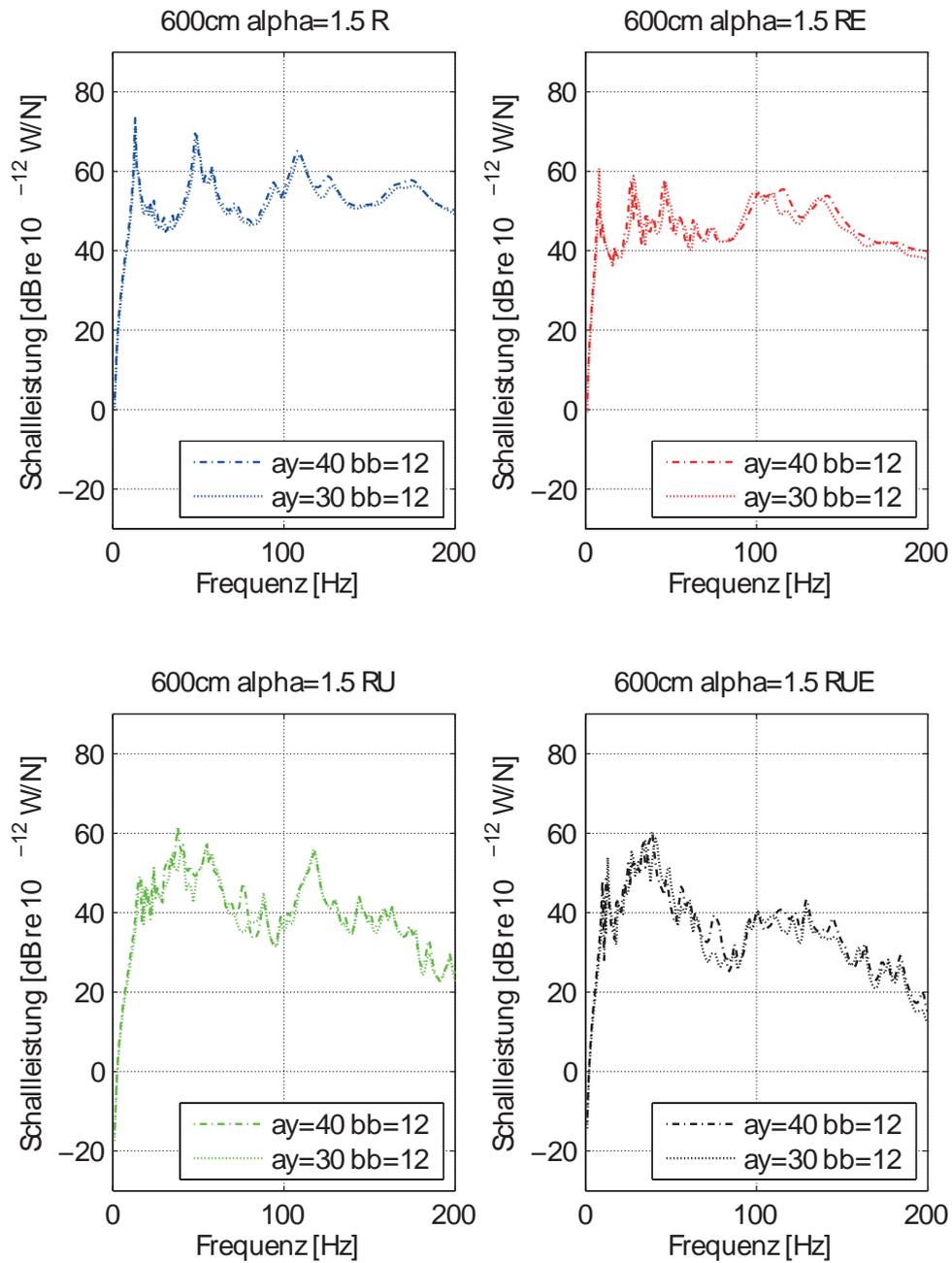
**Abbildung A.86:** HBD, Länge  $l = 550$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



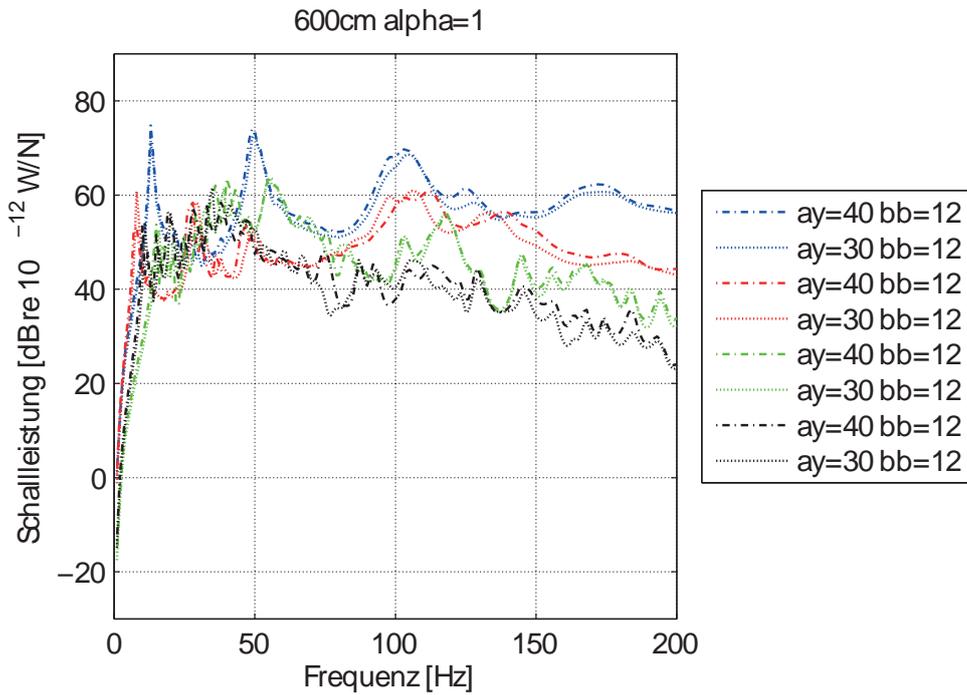
**Abbildung A.87:** HBD, Länge  $l = 550$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



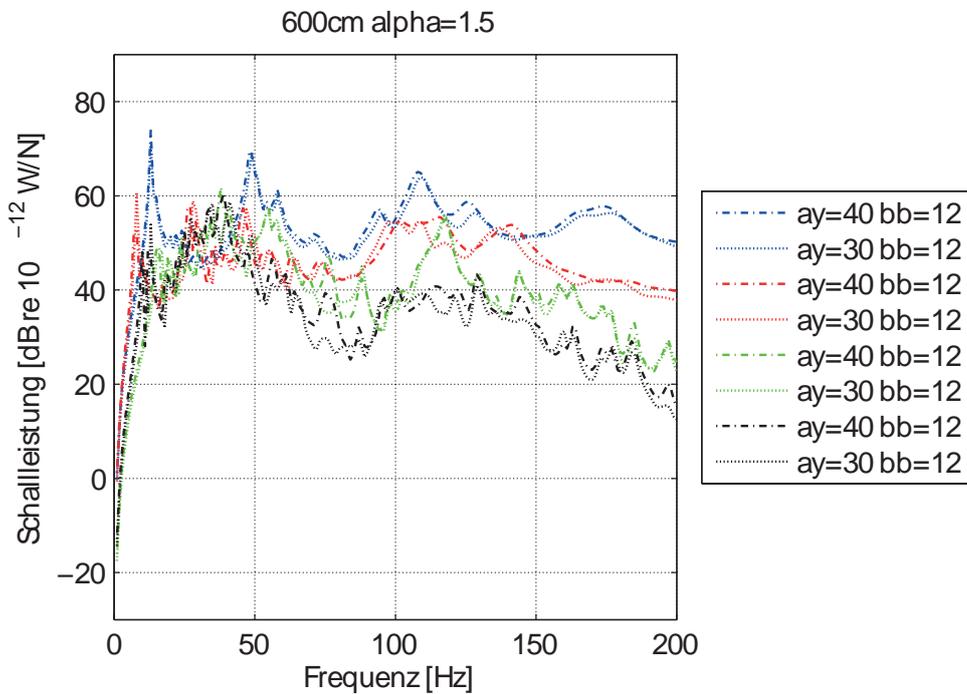
**Abbildung A.88:** HBD, Länge  $l = 6000$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



**Abbildung A.89:** HBD, Länge  $l = 600$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm



**Abbildung A.90:** HBD, Länge  $l = 600$  cm,  $\alpha = 1$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



**Abbildung A.91:** HBD, Länge  $l = 600$  cm,  $\alpha = 1.5$ , Variation von Balkenabstand  $ay$  in cm und Balkenbreite  $bb$  in cm, Ausbaustände: R=blau; RE=rot; RU=grün, RUE=schwarz



## Literaturverzeichnis

- [1] 4150-2, DIN: *Erschütterungen im Bauwesen; Teil 2: Einwirkung von Menschen in Gebäuden*. Juni 1999
- [2] ALLEMANG, R. J.: The Modal Assurance Criterion - Twenty Years of Use and Abuse. In: *Sound and Vibration* (2003), August, S. 14 – 21
- [3] ANGERER, Ludwig: *Berechnung des akustischen Abstrahlverhaltens von Verbunddecken-systemen mit abgehängter Decke*, Technische Universität München, Masterarbeit, 2011
- [4] ANSYS, Inc.: *ANSYS 14.0 Help*. 2011. 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, U.S.A.:
- [5] BANGERT, F.: *Schalleistungsberechnung und Schallquellenlokalisierung anhand von Schallintensitätsmessungen*, Fachhochschule Düsseldorf, Diplomarbeit, 2000
- [6] BORCH, F.: *Analysis of Eigen Frequencies and Mode Shapes for Wooden Structured Floors - Vibration technical investigation / Technische Universität München*. 2013. – Forschungsbericht
- [7] BRÜEL & KJAER: *Schallintensität*. Brüel & Kjaer, 1993
- [8] BRIDGMAN, P.W.: *Theorie der physikalischen Dimensionen: Ähnlichkeitsbetrachtungen in der Physik*. Leipzig, Berlin : Verlag B. G. Teubner, 1932
- [9] BRINKMANN, J.: *Untersuchungen zur integration von Schwinungstilgern in Brettsperholz-decken*, Hochschule Rosenheim, Diplomarbeit, 2010
- [10] BUTZ, E.C.: *Beitrag zur Berechnung fußgängerinduzierter Brückenschwingungen*. Shaker Verlag - Dissertation, 2006
- [11] CREMER, L. ; HECKL, M. ; PETERSSON, B.A.T.: *Structure Borne Sound*. 3. Springer, 2005
- [12] DEN HARTOG J.P.: *Mechanische Schwingungen*. Springer Verlag Berlin, 1952
- [13] DIN12369-1: *Holzwerkstoffe - Charakteristische Werte für die Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Teil 1: OSB, Spanplatten und Faserplatten*. 2001
- [14] DIN45669-1: *Messung von Schwingungsimmissionen - Teil 1:Schwingungsmesser - Anforderungen und Prüfungen*. 2010
- [15] DINEN1995: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten*. Dezember 2010

- [16] ERMANNI, P.: Faserverstärkte Kunststoffe / Centre of Structure Technologies - ETH Zürich. 2010. – Forschungsbericht. Vorlesungsskript
- [17] FRISWELL, M. ; MOTTERSHEAD, J.E.: *Finite element model updating in structural dynamics*. Springer Verlag, 1995
- [18] GETZNER, Werkstoffe G.: *Freqcalc*. Internet. Juli 2011. – URL <https://www.getzner.com/benutzerbereich/freqcalc/>
- [19] GETZNER WERKSTOFFE GMBH: *Sylomer, Detaildatenblatt*. Internet. März 2010. – URL [http://www.getzner.com/index.php?eID=tx\\_nawsecured1&u=3228&file=fileadmin/downloads/01\\_werkstoffe/sylomer\\_dbl/de/detaildbl/Sylomer\\_Detaildatenblatt\\_D\\_01.pdf&t=1386155194&hash=fcd9b30e8c8475d77064131980092ebb03ab2fbe](http://www.getzner.com/index.php?eID=tx_nawsecured1&u=3228&file=fileadmin/downloads/01_werkstoffe/sylomer_dbl/de/detaildbl/Sylomer_Detaildatenblatt_D_01.pdf&t=1386155194&hash=fcd9b30e8c8475d77064131980092ebb03ab2fbe)
- [20] GETZNER WERKSTOFFE GMBH: *Sylomer SR-11, Produktdatenblatt*. Internet. März 2012. – URL [http://www.getzner.com/index.php?eID=tx\\_nawsecured1&u=3228&file=fileadmin/downloads/01\\_werkstoffe/sylomer\\_dbl/de/werkstoffdbl/02-DB-Sylomer-SR11-DE.pdf&t=1386155194&hash=1b08f5ceb190a89366d343d2ac446843a7ff828a](http://www.getzner.com/index.php?eID=tx_nawsecured1&u=3228&file=fileadmin/downloads/01_werkstoffe/sylomer_dbl/de/werkstoffdbl/02-DB-Sylomer-SR11-DE.pdf&t=1386155194&hash=1b08f5ceb190a89366d343d2ac446843a7ff828a)
- [21] GLUNZ, AG: *AGEPAN® OSB 4 / PUR, Produktdatenblatt*. Internet. September 2013
- [22] GÜLZOW, A.: *Zerstörungsfreie Bestimmung der Biegesteifigkeiten von Brettsperrholzplatten*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2008
- [23] GREIM, A.: *Identifikation der Materialparameter einer Brettsperrholzdecke durch Kalibrierung eines numerischen Modells mit gemessenen Eigenfrequenzen*, Technische Universität München, Masterarbeit, 2012
- [24] GRIMSEL, M.: *Mechanisches Verhalten von Holz*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1999
- [25] HANKE, T.: *Auslegung und Konstruktion von Schwingungstilgern für Holzdeckenkonstruktionen*, Hochschule Rosenheim, Diplomarbeit, 2012
- [26] HERAKLITH GMBH: *Heralan TP, Steinwolle-trittschalldämmplatte*. Juni 2013
- [27] KNAUF TROCKENBAU- UND BODEN-SYSTEME: *Fließestrich FE50 Largo Produktdatenblatt*. Juni 2013
- [28] KNAUF TROCKENBAU UND BODENSYSTEME: *F12.de Knauf Fertigteilestrich*. Internet. Oktober 2012. – URL <http://www.knauf.de/wmv/?id=1017>
- [29] KOHRMANN, M. ; BUCHSCHMID, M. ; VÖRTL, R. ; MÜLLER, G. ; SCHANDA, U.: Prognose von sekundärem Luftschall bei leichten Geschosdeckensystemen mit Integraltransformationmethoden. In: *DAGA*. Darmstadt : DAGA, 2012

- [30] KOHRMANN, M. ; DENGLER, M. ; ANGERER, L. ; REUTER, C. ; PUNET CORVILLO, M. J. ; KREUTZ, J. ; RUNTEMUND, K. ; TROMETER, S. ; MÜLLER, G. (Hrsg.) ; BUCHSCHMID, M. (Hrsg.): *Untersuchungen zum Schwingungsverhalten leichter Verbunddeckensysteme*. Aachen : Shaker Verlag, 2011
- [31] KRETSCHMANN, D.: *Mechanical properties of wood: Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 5*. Centennial ed. Madison, WI : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010
- [32] LIEBLANG, P.: *Beitrag zur Beschreibung des elastischen Materialverhaltens von Holz mit Methoden der Mikromechanik*, Reinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, 2000
- [33] LIGNOTREND: *Detailzeichnung LIGNO Rippe Q3-169*. 2013.  
– URL [http://www.lignotrend.de/service/downloads/elementzeichnungen-einzeln/?tx\\_simplefilebrowser\\_pi1%5Bpath%5D=%2Fhome%2Fwww%2Fp184453%2Fhtml%2Ftypo3%2Ffileadmin%2Felementquerschnitte%2FDXF%20und%20PDF%20%282D%29%2F123%20Rippe%20Q3%2F169%2Fgeschlossen&tx\\_simplefilebrowser\\_pi1%5Bfile%5D=c243b5b960195aeff2f45631f5c2485a](http://www.lignotrend.de/service/downloads/elementzeichnungen-einzeln/?tx_simplefilebrowser_pi1%5Bpath%5D=%2Fhome%2Fwww%2Fp184453%2Fhtml%2Ftypo3%2Ffileadmin%2Felementquerschnitte%2FDXF%20und%20PDF%20%282D%29%2F123%20Rippe%20Q3%2F169%2Fgeschlossen&tx_simplefilebrowser_pi1%5Bfile%5D=c243b5b960195aeff2f45631f5c2485a)
- [34] MAZNIKOVA, Gergana: *Baupraktische Untersuchung der Tragkonstruktion abgehängter Deckensysteme - Numerisches Modell und messtechnische Untersuchung*, Technische Universität München, Bachelorarbeit, 2012
- [35] MEISTRING, Philip: *FEM-Simulation und Messung des Schwingungsverhaltens eines Holzstegträgers zum Abgleich elastomechanischer Größen*, HS Rosenheim, Masterarbeit, 2005
- [36] METSÄ WOOD MERK GMBH: *Leno® Broschüre*. August 2012. – URL [http://www.metsawood.de/bauundkonstruktion/downloads/Documents/Leno\\_Broschuere\\_DE\\_082012.pdf](http://www.metsawood.de/bauundkonstruktion/downloads/Documents/Leno_Broschuere_DE_082012.pdf)
- [37] MÜLLER, G.: *Continuum Mechanics and Tensor Analysis / Lehrstuhl für Baumechanik - Technische Universität München*. 2010. – Forschungsbericht. Vorlesungsskript
- [38] MÜLLER, G.: *Selected Topics of Technical Acoustics / Lehrstuhl für Baumechanik, Technische Universität München*. 2010. – Forschungsbericht. Vorlesungsskript
- [39] MÜLLER, G.: *Baudynamik / Lehrstuhl für Baumechanik - Technische Universität München*. 2011. – Vorlesungsskript
- [40] MÜLLER, G. ; BUCHSCHMID, M. ; L., Angerer ; DENGLER, M. ; KOHRMANN, M. ; PUNET CORVILLO, M.J. ; REUTER, C. ; KREUTZ, K. ; TROMETER, S.: *Untersuchungen zum Schwingungsverhalten leichter Verbunddeckensysteme*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Baumechanik, 2011
- [41] MÜLLER, G. ; GROTH, C.: *FEM für Praktiker*. Bd. 1: *Grundlagen*. 8., neu bearb. Aufl. Renningen : expert-Verl., 2007

- [42] MÖSER, M. ; KROPP, W. ; CREMER, L. ; HECKL, M.: *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. Springer, 2009
- [43] NEUHAUS, H.: *Ingenieurholzbau: Grundlagen - Bemessung - Nachweise - Beispiele*. Vieweg + Teubner Verlag, 2009
- [44] PETERSEN, C.: *Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau*. Maurer Söhne GmbH & Co.KG, 2001
- [45] REICHELT, H.: *Schwingungsreduzierung bei Holzdecken durch Schwingungstilger*, Hochschule Rosenheim, Masterarbeit, 2008
- [46] REICHELT, H.: *Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Holzstegträgerdecken mit Schwingungsdämpfern*, Hochschule Rosenheim, Diplomarbeit, 2009
- [47] REUTER, Claus: *Numerische Modellierung und messtechnische Verifikation einer stochastischen Anregung durch Fußgänger*, Technische Universität München, Masterarbeit, 2011
- [48] RUNTEMUND, K.: *Beitrag zur Prognose der Erschütterungsausbreitung infolge bewegter Lasten in Tunnels unter Verwendung dimensionsloser Kennzahlen*, Technische Universität München, Masterarbeit, 2006
- [49] RWTH AACHEN: *Leitfaden zur Schwingungsbemessung von Decken*. Internet. Dezember 2008. – URL [http://www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2007/HIVOSS/docs/Guideline\\_Floors\\_DE01.pdf](http://www.stb.rwth-aachen.de/projekte/2007/HIVOSS/docs/Guideline_Floors_DE01.pdf)
- [50] SREMCEVIC WITZIG, J.: *Model reduction methodes in room acoustical simulation at aow frequencies*, Technische Universität München, Dissertation, 2012
- [51] STELZMANN, U. ; GROTH, C. ; MÜLLER, G.: *FEM für Praktiker*. Bd. 2: *Strukturdynamik*. 5., neu bearb. Aufl. Renningen : expert-Verl., 2008
- [52] STICHLMAIR, J.: *Kennzahlen und Ähnlichkeitsgesetze im Ingenieurwesen*. Essen : Altos-Verlag Doris Stichlmair, 1990
- [53] THALLER, B.: *Grundlagen physikalischer Prozesse / Karl-Franzens-Universität Graz*. 2004. – Forschungsbericht. Vorlesungsskript
- [54] TRÖBS, H.M.: *Schallintensitätsmessung an einer abgehängten Unterdecke und Reduzierung ihrer Schallabstrahlung*, Hochschule Rosenheim, Bachelorarbeit, 2013
- [55] VDI 3833, BLATT 2: *Schwingungsdämpfer und Schwingungstilger*. Dezember 2006
- [56] VDI2038: *Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen*. 2010
- [57] VDI2057: *Einwirkung mechanische Schwingungen auf den Menschen*. 2002
- [58] VÖLTL, R. ; SCHANDA, U. ; KOHRMANN, M. ; BUCHSCHMID, M. ; MÜLLER, G.: *Simultaneous operational vibration analysis of different layers of lightweight timber floors*. In: *Internoise*. Innsbruck : Internoise, 2013



- [59] WIECHERT, L.: *1:1 Modell einer Verbunddeckenkonstruktion Erstellung zweier Finite-Elemente-Modelle in APDL (ANSYS Parametric Design Language) und Gegenüberstellung der Ergebnisse der Modalanalysen Grundlagen der Statistischen Energieanalyse*, Technische Universität München, Masterarbeit, 2005
- [60] WINTER, C.: *Messtechnische Untersuchung leichter Deckentragwerke im Wellenzahlbereich und Prognose der abgestrahlten Schalleistung*, Technische Universität München - Lehrstuhl für Baumechanik, Masterarbeit, 2012
- [61] ZAVERI, M.Phil. A.: *Modal Analysis of Large Structures - Multiple Exciter Systems*. Bruel&Kjaer, 1984. – ISBN 8787355035
- [62] ZIEREP, J.: *Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln der Strömungslehre*. Karlsruhe : Verlag G. Braun, 1982