

# Ein Beitrag zur Aufarbeitung der Schwingungsthematik für die Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz

M-4-3/2013



**Severin Emanuel Zimmer**  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz



# Ein Beitrag zur Aufarbeitung der Schwingungsthematik für die Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz

A Contribution to the Subject of Vibrations in  
Solid Timber Construction with CLT

Masterarbeit von  
**Severin Emanuel Zimmer, BSc**

Eingereicht am  
Institut für Holzbau und Holztechnologie  
Technische Universität Graz

Begutachtung:  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer

Betreuer:  
Dipl.-Ing. Georg Flatscher

Graz, Jänner 2013

---



Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, und die in den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

---

Severin Emanuel Zimmer

Graz, Jänner 2013

---



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei alljenen bedanken, welche mich beim Erstellen dieser Arbeit und im Zuge meines Studiums unterstützt und begleitet haben.

Allen voran gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer, Leiter des Instituts für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz sowie der holz.bau forschungs gmbh, für die Unterstützung und Förderung, welche er mir im Rahmen meiner Arbeit entgegenbrachte und für die abschließende kritische Begutachtung meiner Masterarbeit.

Einen besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer DI Georg Flatscher aussprechen, welcher mir in den vielen Gesprächen, neben fachlichen Hilfestellungen und Ratschlägen auch als Freund immer wieder Wertschätzung entgegenbrachte. Durch seine Hilfsbereitschaft, das entgegengebrachte Vertrauen und die kritischen Anmerkungen in themenbezogenen Diskussionen hat er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Bei Herrn DI Andreas Ringhofer möchte ich mich unter anderem für die bereitwillige Unterstützung und den Einsatz bei der Durchführung der Messungen bedanken. Neben vielen freundschaftlichen Gesprächen gilt mein Dank auch für die notwendigen Unterlagen und Informationen zum Bauvorhaben `_massive_living`, welche er mir mit großer Selbstverständlichkeit zur Verfügung gestellt hat.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn DI Manfred Augustin für die Ratschläge und Hilfestellungen bedanken, welche er mir in spontanen Gesprächen und Diskussionen immer wieder zuteil werden lies.

Weiters gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Institutes für Holzbau und Holztechnologie und der holz.bau forschungs gmbh, welche mich mit Gesprächen und Hilfestellungen während meiner Arbeit begleitet haben.

Für das Korrekturlesen und die daraus resultierende textliche Verfeinerung gebührt Herrn Ao.Univ.-Prof. Mag. Dr.theol. Karl Prenner mein herzlicher Dank.

Für die schöne Zeit und die Unterstützung, welche mir durch Freunde und Studienkollegen zuteil wurden, möchte ich mich an dieser Stelle ebenfalls bedanken.

Mein größter Dank gilt jedoch meinen Eltern Franziska und Johann Zimmer, meinen Geschwistern Johannes, Magdalena, Valentin, Matthäus, David, Lisa und Esther sowie meiner Freundin Hemma Prenner, welche mich auf meinem Weg durch das Studium unterstützt und gefördert haben. Besondere Anerkennung gilt meinen Eltern, da sie uns Kindern mit großer Hingabe den Bildungsweg ermöglichten, welcher unseren Wünschen und Vorstellungen entsprach.

---



## Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit personeninduzierten, vertikalen Schwingungen mit Schwerpunkt auf Wohnungsdecken aus Brettsperrholz (BSP). Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die messtechnische Erfassung und Auswertung von Schwingungsparametern gelegt, welche anhand von Messungen im Wohnbauprojekt `_massive_living` durchgeführt wurden.

Nach einer kurzen Einführung in die Schwingungslehre folgt eine Auseinandersetzung mit der menschlichen Wahrnehmung in Bezug auf vertikale Schwingungen. Anhand von chronologisch gereihten Forschungsbeispielen werden die Schwierigkeiten aufgezeigt, welche sich bei der quantitativen Erfassung und Zuordnung von subjektiven Empfindungen in Verbindung mit messbaren Größen ergeben.

Aus den Grundlagen der Messtechnik und ähnlich gelagerten Forschungsarbeiten wurden wesentliche Informationen für die Bestimmung von Schwingungsparametern erarbeitet, welche anhand der dynamischen Antwort eines schwingungsfähigen Systems gewonnen werden können. Dieses Wissen bildet in weiterer Folge die Basis für die Auswertung der Messdaten, welche im Wohnbauprojekt `_massive_living` aufgezeichnet wurden, wobei die Bestimmung der Eigenfrequenzen und der Dämpfungsmaße zentrale Punkte darstellen.

Messungen an Deckenplatten mit verschiedenen Lagerungsbedingungen in jeweils zwei oder drei verschiedenen Bauphasen, welche im Wohnbauprojekt `_massive_living` durchgeführt wurden, sind ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit, weshalb in dem diesbezüglichen Kapitel die relevanten, konstruktiven Details der baulichen Ausführung und der Ablauf der Messungen aufbereitet sind. Auf Basis der konstruktiven Details und der ausgewerteten Schwingungsparameter werden schlussendlich Analysen durchgeführt, die jeweils die Einflüsse auf das dynamische Verhalten der Decke aufzeigen, welche durch unterschiedliche Lagerbedingungen und mögliche Einspannungseffekte in den Auflagern verursacht werden.

Die Ergebnisse führen zu der Erkenntnis, dass eine abnehmende Systemsteifigkeit in Form von „weicheren“ Auflagerbedingungen und geringerer Einspannwirkung in den Auflagern zu größeren Dämpfungen sowie einer leichteren Anregbarkeit in der Schwingbeschleunigung führt. Im ausgebauten Zustand ergeben sich, neben hohen Dämpfungswerten, vor allem erste Eigenfrequenzen, die gegenüber der normativen Berechnung wesentlich günstiger ausfallen.

---



## Abstract

This master thesis deals with human induced, vertical vibrations with focus on floors of residential buildings made of Cross Laminated Timber (CLT). Attention was on testing method and evaluation of vibration parameters, which were gained by measurements in frame of the housing project `_massive_living`.

After a brief introduction to the theory of vibrations, the correlation between human perception and vertical vibrations is discussed. The difficulties, which occur by relating the subjective human perception to measurable quantities, is shown on the basis of chronological arranged research examples.

Based on metrology and research works with similar content, essential information for determining vibrational parameters obtained from the dynamic response of a vibratory system have been developed. This knowledge is the basis for the subsequently evaluation of measurement data, which were recorded in the housing project `_massive_living`, at which the determination of the natural frequencies and damping ratios are central points.

Measurements on plates with different supporting conditions carried out in two or three different construction phases within the housing project `_massive_living` are an essential part of this work. Therefore the relevant design details of building construction and the sequence of measurements are processed in referring chapters. Based on the construction details and the evaluated dynamic parameters, final analyses are carried out and show the effects of different supporting conditions as well as possible effects of clamping in the supports on the dynamic behaviour of the floors.

The results lead to the conclusion, that decreasing system stiffness in terms of "soft" boundary conditions and lower clamping in the supports leads to higher damping ratios and an easier excitation of floors. Beside high damping ratios, the determined fundamental frequencies in the extension phase are much better than calculated with the help of standards.

---





## Kapitel 1: Einführung

1	Motivation .....	1
2	Brettsperrholz .....	2
2.1	Herstellung und Aufbau.....	2

## Kapitel 2: Grundlagen der Schwingungslehre

3	Definition und Grundbegriffe [13]; [9] .....	7
3.1	Gliederung der Schwingungen .....	8
3.1.1	Harmonische Schwingung .....	8
3.1.2	Periodische Schwingung .....	8
3.1.3	Zufallsschwingung .....	9
3.2	Grundbegriffe [8].....	9
4	Einmassenschwinger [9]; [15] .....	10
4.1	Freie, ungedämpfte Schwingung .....	12
4.2	Freie, gedämpfte Schwingung .....	12
4.3	Ungedämpfte Schwingung mit harmonischer Anregung.....	14
4.4	Gedämpfte Schwingung mit harmonischer Anregung .....	15
5	Dynamische Lasten im Bauwesen [9] .....	18
5.1	Harmonische Lasten .....	18
5.2	Periodische Lasten .....	18
5.3	Transiente Lasten .....	19
5.4	Impulsartige Lasten .....	19
5.5	Personeninduzierte Lasten auf Wohnungsdecken .....	19

## Kapitel 3: Menschliche Wahrnehmung

6	Forschungsergebnisse.....	21
---	---------------------------	----

6.1	Reiher und Meister (aus [14]) .....	21
6.2	Lenzen (aus [23]) .....	22
6.3	Wiss und Parmelee (aus [14], [23]) .....	22
6.4	Allen und Rainer (aus [14]) .....	24
6.5	Rasmussen (aus [14]) .....	25
6.6	Ohlsson [17], [18] .....	26
6.7	Chui (aus [23]) .....	26
6.8	Kreuzinger und Mohr [14] .....	27
6.9	Alvis (aus [23]) .....	28
6.10	Ljunggren und Ljunggren et al. (aus [23]) .....	28
<b>7</b>	<b>ISO 2631 .....</b>	<b>29</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>32</b>

## Kapitel 4: Versuchstechnik

<b>9</b>	<b>Versuchstechnische Bestimmung von Systemparametern .....</b>	<b>33</b>
9.1	Anregungsarten .....	33
9.1.1	Nullmessung .....	33
9.1.2	Faustschlag von unten .....	34
9.1.3	Impulshammer .....	34
9.1.4	Auslenkung .....	34
9.1.5	heel-drop .....	34
9.1.6	Sackabwurf .....	36
9.1.7	Shaker .....	36
9.1.8	Freies Gehen .....	37
9.1.9	Geregeltes Gehen .....	37
9.1.10	Anregung mit Bürste oder Trolley .....	37
9.2	Modalanalyse .....	38
9.3	Bestimmung der Eigenfrequenzen/Eigenformen .....	38
9.4	Bestimmung der Dämpfung von Baukonstruktionen .....	40
9.4.1	Bestimmung von Dämpfungswerten aus Versuchen .....	40
9.4.2	Allgemeines zu den Dämpfungen .....	43

## Kapitel 5: Messungen \_massive\_living

<b>10</b>	<b>Objektbeschreibung .....</b>	<b>45</b>
-----------	---------------------------------	-----------

<b>11</b>	<b>Ausführungsdetails .....</b>	<b>48</b>
11.1	Gliederung der Brettsperrholzelemente .....	48
11.2	Auflager der Zwischendecken .....	49
11.3	Stoßausbildung der Deckenelemente .....	50
11.4	Fußbodenaufbau .....	51
<b>12</b>	<b>Beschreibung der Messpunkte .....</b>	<b>51</b>
12.1	Verwendete Punktbezeichnung .....	52
12.2	Lagerbedingungen der gewählten Elemente .....	54
12.3	Anordnung der Messpunkte am Element .....	54
<b>13</b>	<b>Abwicklung der Messungen .....</b>	<b>56</b>
13.1	Bedingungen bei der 1. Messung .....	56
13.2	Bedingungen bei der 2. Messung .....	57
13.3	Schwingungsanregung .....	58
13.3.1	Dauer der Messungen .....	58
13.4	Versuchspersonen .....	58
13.5	Einheit der aufgezeichneten Daten .....	59
<b>14</b>	<b>Verwendetes Messequipment .....</b>	<b>59</b>
14.1	Schwingungssensoren .....	59
14.2	Messverstärker .....	60
14.3	Messprogramm .....	60
<b>15</b>	<b>Subjektive Bewertung .....</b>	<b>61</b>

## Kapitel 6: Auswertung der Messungen

<b>16</b>	<b>Ausgewertete Parameter der Schwingungsmessungen .....</b>	<b>63</b>
16.1	Daten zufolge heel-drop .....	63
16.2	Daten zufolge freies Gehen .....	64
<b>17</b>	<b>Vorgehensweise bei der Auswertung .....</b>	<b>64</b>
17.1	Schwingungsgrößen .....	65
17.1.1	Schwingbeschleunigung .....	65
17.2	Schwinggeschwindigkeit .....	67

17.2.1	Ergebnisse .....	68
17.3	Eigenfrequenz .....	69
17.3.1	Ergebnisse .....	73
17.3.2	Eigenfrequenz aus Zeitsignal .....	73
17.4	Dämpfung .....	73
17.4.1	Einflussgrößen und Genauigkeit .....	75
17.4.2	Umhüllende Exponentialfunktion .....	78
17.4.3	Ergebnisse .....	79
<b>18</b>	<b>Schwebungen .....</b>	<b>80</b>

## Kapitel 7: Analyse der Daten

<b>19</b>	<b>Einbauunabhängige Eigenschaften .....</b>	<b>83</b>
19.1	Einfluss der Versuchsperson .....	83
19.1.1	Schwingungsgrößen .....	83
19.1.2	Eigenfrequenzen .....	85
19.1.3	Dämpfungen .....	85
19.2	Einfluss der Messposition .....	86
19.2.1	Schwingungsgrößen .....	86
19.2.2	Eigenfrequenzen .....	87
19.2.3	Dämpfungen .....	87
<b>20</b>	<b>Einbauabhängige Eigenschaften .....</b>	<b>89</b>
20.1	Einfluss der Lagerbedingungen .....	89
20.1.1	Schwingungsgrößen .....	89
20.1.2	Eigenfrequenzen .....	91
20.1.3	Dämpfungen .....	93
20.2	Einfluss der Einspannungswirkung .....	94
20.2.1	Schwingungsgrößen .....	94
20.2.2	Eigenfrequenzen .....	95
20.2.3	Dämpfungen .....	98
<b>21</b>	<b>Zusammenfassung der Analyse .....</b>	<b>100</b>
21.1	Schwingungsgrößen .....	100
21.2	Eigenfrequenzen .....	100
21.2.1	Vergleich mit Handrechnung .....	101
21.3	Dämpfungen .....	102

---

## Kapitel 8: Zusammenfassung

### Anhang

<b>22</b>	<b>Anhang A - Bezeichnungen, Formelzeichen und Begriffe.....</b>	<b>108</b>
22.1	Bezeichnungen und Formelzeichen.....	108
22.2	Begriffe.....	110
<b>23</b>	<b>Anhang B - Produktdatenblätter.....</b>	<b>112</b>
23.1	Brettsperrholz.....	112
23.2	Fugenband Trelleborg.....	115
<b>24</b>	<b>Anhang C - Ergebnisse der subjektiven Bewertung .....</b>	<b>116</b>
24.1	Rohbauphasen.....	116
24.2	Ausbauphase.....	117
<b>25</b>	<b>Anhang D - Ergebnisse der Messungen .....</b>	<b>118</b>
25.1	Schwingungsgrößen Rohbauphasen.....	118
25.2	Schwingungsgrößen Ausbauphase.....	126
25.3	Frequenzspektren.....	134
25.4	Eigenfrequenzen Rohbauphasen.....	150
25.5	Eigenfrequenzen Ausbauphase.....	154
25.6	Dämpfungsmaße Rohbauphase.....	157
25.7	Dämpfungsmaße Ausbauphase.....	159
<b>26</b>	<b>Anhang E - Berechnung der Biegesteifigkeit.....</b>	<b>165</b>
26.1	BSP ohne Aufbau.....	165
26.2	BSP mit Aufbau.....	166

### Literaturverzeichnis



# Einführung

## 1 Motivation

Holz ist ein Rohstoff, welcher aufgrund der vorhandenen Kapazitäten im österreichischen Bauwesen traditionell eine wesentliche Rolle spielt. Im gegenwärtigen Umdenkprozess in Bezug auf Klimaerwärmung, Umweltverschmutzung und Rohstoffknappheit erfuhr dieser Rohstoff in den letzten Jahren wieder zunehmend an Bedeutung, da dieser nachwachsend, und je nach Verarbeitung im Bauwesen auch CO<sub>2</sub>-bindend, wesentliche Eigenschaften für die Nachhaltigkeit mit sich bringt. Die Kombination des Rohstoffs Holz mit neuen Technologien brachte weiterentwickelte Bauprodukte wie das Brettsperrholz (BSP) hervor, welches nicht nur vielfältige Anwendungsmöglichkeiten aufweist, sondern zudem einen ökonomischen, effizienten Bauablauf ermöglicht.

Gekoppelt mit den neuen Technologien und gestiegenen erzielbaren Materialfestigkeiten (z.B. durch Homogenisierungseffekte oder Hybrid-Querschnitte), sind die Anforderungen in Richtung größerer, freier Deckenspannweiten und immer niedrigerer Konstruktionshöhen derselben gestiegen. Die daraus resultierenden, verminderten Biegesteifigkeiten führen jedoch zu einer erhöhten Anfälligkeit in Bezug auf Vertikalschwingungen, welche in weiterer Folge vom Nutzer als unangenehm empfunden, den Gebrauchstauglichkeitsnachweis maßgebend werden lassen. Die ÖNORM EN 1995-1-1 [1] und ÖNORM B 1995-1-1 [2] bieten in ihrer aktuellen Fassung die Möglichkeit, Wohnungsdecken aus Holz in Hinblick auf die Schwingungsproblematik anhand normativer Regelungen zu bemessen. Es stellt sich jedoch die Frage, ob sich die Bemessung, anhand angepasster Formelwerke und Grenzwerte allgemein und speziell für BSP, nicht ökonomischer und für den bemessenden Ingenieur einfacher in der Anwendung lösen lässt.

Ein wichtiger Punkt bei normativen Regelungen im Bezug auf Deckenschwingungen ist die Erfassung von Grenzwerten. Bei Betrachtung von personeninduzierten Schwingungen bei Wohnungsdecken ist der Zusammenhang zwischen messtechnisch erfassbaren Schwingungsparametern und der subjektiven Wahrnehmung des betroffenen Nutzers schwer in quantitative Größen zu fassen.

Die Schwierigkeiten erschließen sich dabei im Wesentlichen aus drei Sachverhalten:

- Die Wahrnehmung von Schwingungen ist subjektiv und insbesondere von Alter und Verfassung der betroffenen Person abhängig.
- Für die Wahrnehmung von Schwingungen sind mehrere Schwingungsparameter relevant.
- Die Bestimmung von einzelnen Schwingungsparametern ist nicht einheitlich geregelt und unterliegt je nach angenommenen Randbedingungen entsprechenden Abweichungen.

Das Produkt Brettsperrholz ist als verhältnismäßig junges Bauprodukt in Hinblick auf die Schwingungsthematik noch relativ wenig untersucht. Bereits vorhandene Daten zu Schwingungseigenschaften sind zudem meist Laborwerte, was den Untersuchungsbedarf im Bezug auf Einbausituationen unterstreicht. Als Hauptgegenstand dieser Arbeit konnten in-situ Messungen im Wohnbauprojekt `_massive_living`, welches als Holzmassivbau in BSP ausgeführt wurde, durchgeführt werden, um daraus weitere Erkenntnisse über das Schwingungsverhalten von Zwischendecken dieser Bauweise, insbesondere im Einbauzustand, zu erlangen. Betrachtet werden diesbezüglich ausschließlich personeninduzierte Vertikalschwingungen.

## 2 Brettsperrholz

Als Brettsperrholz (BSP) werden „(...) *alle mehrschichtig verklebten, flächenhaften Holzprodukte verstanden, wobei die Faserlängsrichtungen der aus Brettern bestehenden Einzelschichten rechtwinklig zueinander angeordnet sind. Der Querschnittsaufbau (Orientierung, Dicke und Festigkeitsklasse der Einzelschichten) ist zur Mittelebene symmetrisch*“ [21]

### 2.1 Herstellung und Aufbau

Für BSP werden überwiegend Nadelholzarten wie Fichte, Kiefer, Lärche und Tanne verwendet, wobei in der Regel Fichtenholz die Standardausführung darstellt. Das Ausgangsprodukt der sägerauen Bretter wird vorwiegend aus den Stammrandzonen gewonnen. Diese sogenannte „Seitenware“ aus adultem Holz besitzt gewöhnlich eine höhere Festigkeit und Steifigkeit als die „Hauptware“, welche aus dem Kernbereich desselben Stammes stammt (siehe Abb. 1.1).

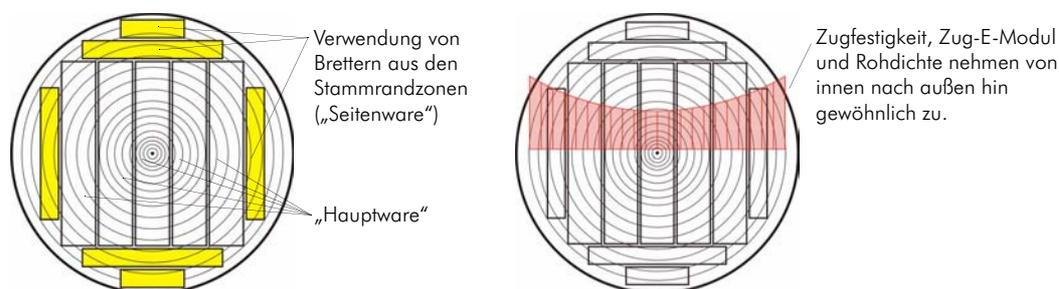


Abb. 1.1 Lage der Einzelbretter im Stamm und Festigkeitsverteilung [21]

Die Abmessungen der verwendeten Brettware betragen 80 bis 240 mm in der Breite und 10 bis 35 mm in der Dicke, wobei das Verhältnis Breite zu Dicke mit  $b : d \geq 4 : 1$  festgelegt werden sollte (siehe Abb. 1.2).

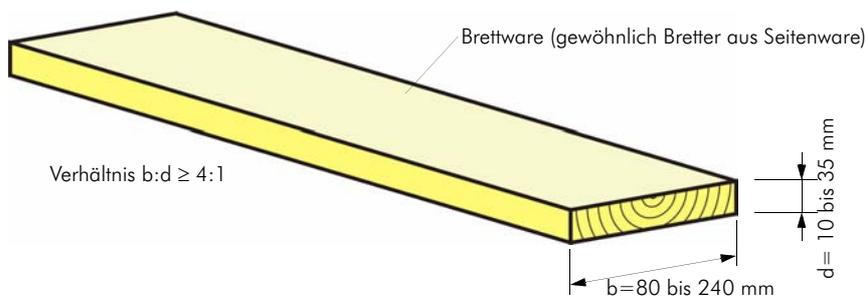


Abb. 1.2 Abmessungen der verwendeten Brettware für BSP [21]

Um die Längen der einzelnen Bretter zu erlangen, welche für das Endprodukt gefordert sind, werden diese bei gleichzeitiger Aussortierung von festigkeitsmindernden Bereichen durch Keilzinken längenaddiert. Die Keilzinkenverbindungen sind dabei gemäß ÖNORM EN 385 auszuführen. Für die Verklebung der Keilzinken sowie in weiterer Folge für die Verklebung der Brettlamellen ist ein Klebstoff für tragende Bauteile zu verwenden, welcher den Anforderungen der ÖNORM EN 301 entspricht.

In einem weiteren Arbeitsgang wird die Brettware gehobelt und kann je nach Ausstattung des Herstellers auch mit einer profilierten (Nut und Feder) oder konisch verlaufenden Kante versehen werden. Mit den so gewonnenen Brettlamellen werden durch parallele Anordnung Einschichtplatten aufgebaut, wobei auf einen adequate Längsabstand der Keilzinkenverbindungen in benachbarten Lamellen Rücksicht zu nehmen ist (mindestens ein Drittel der Brettbreite analog der EN 386:1995 für laminiertes Brett-schicht-holz (BSH)). Um eine erhöhte Luftdichtheit zu erzielen, kann nach Möglichkeit des Herstellers auch eine Kantenverklebung erfolgen, was in den Decklagen jedoch zu unkontrollierter Rissbildung an der Oberfläche führen kann und bei sichtbarem Einbau eventuell unerwünscht ist.

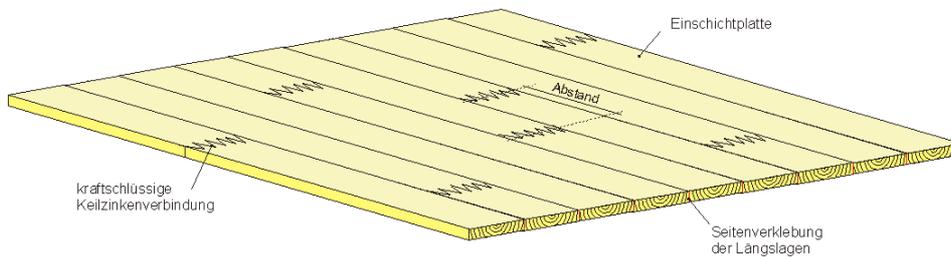


Abb. 1.3 aus seitlich verklebten Brettlamellen gebildete Einschichtplatte [21]

Diese oben angeführte Einschichtplatte (Abb. 1.3) wird nun in einzelnen Schichten übereinander angeordnet und unter entsprechendem Pressdruck verklebt. Die Orientierung der Längsrichtung wechselt dabei um jeweils  $90^\circ$ , ist aber auch mit  $45^\circ$  versetzter bzw. paralleler Orientierung von zwei aufeinanderfolgenden Einzelschichten möglich, wobei ein symmetrischer Aufbau des fertigen Gesamtquerschnitts gefordert ist.

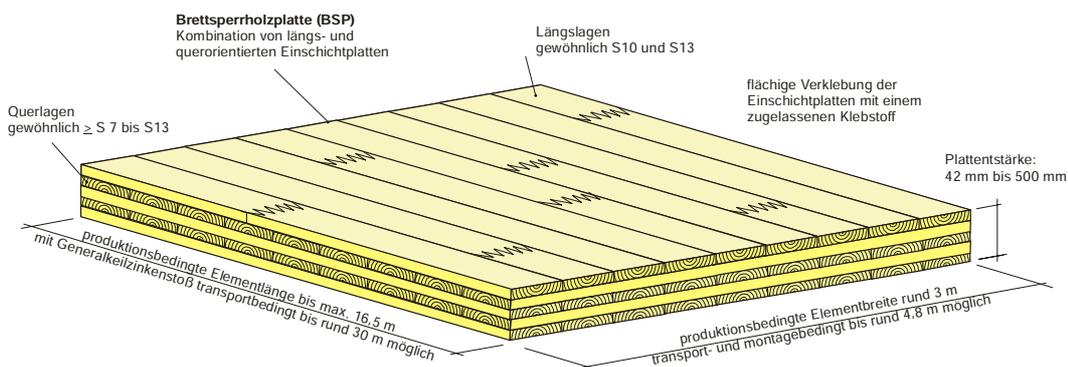


Abb. 1.4 Aufbau einer 5-schichtigen Brettsper Holzplatte [21]

Das fertige Produkt Brettsper Holz kann als orthogonal tragfähiges Element mit Abmessungen von bis zu rund 16,5 m in der Länge, 3 m in der Breite und 0,5 m in der Stärke hergestellt werden. Bestimmt werden die maximalen Abmessungen dabei von Randbedingungen aus Produktion, Transport und Montage. Unter Anwendung von Generalkeilzinkenstoßen und/oder schichtweiser Verklebung von mehreren BSP-Elementen sind auch größere Abmessungen möglich.

Die resultierenden Eigenschaften von Brettsper Holz in Form von platten- und scheibenförmiger Tragwirkung ermöglichen einen vielfältigen Einsatz dieses Produktes. So sind neben Ausführungen als Wand-, Decken- und Dachelemente im Wohn-, Gewerbe- und Industriebau auch Anwendungen im Brückenbau möglich. Zusätzliche Verstärkungen und Aussteifungen können gegebenenfalls auch durch linienförmige Bauteile wie BSH oder Vollholzträger ergänzt werden (siehe Abb. 1.5). Große Spannweiten ( $> 4 - 5$  m) bzw. höhere Wandelemente ohne zusätzliche Abstützungen können unter anderem durch kombinierte Querschnitte mit aufgeklebten Brettschichtholzträgern (z.B. Rippenplatten oder Kastenquerschnitte) bewerkstelligt werden.



Abb. 1.5 Wand- und Deckenelemente aus BSP mit ergänzenden, linienförmigen Bauteilen aus BSH (Säule, Unterzug) im Wohnbau \_massive\_living



# Grundlagen der Schwingungslehre

Die in diesem Kapitel behandelten Themengebiete bilden die wesentlichen Grundlagen für die Aufbereitung, Analyse und Interpretation in den folgenden Kapiteln dieser Arbeit und sollen zur besseren Verständlichkeit der Inhalte beitragen.

## 1 Definition und Grundbegriffe [13]; [9]

*„Als Schwingung bezeichnet man die zeitliche Veränderung einer Schwingungskenngröße, die die Bewegung oder Position eines mechanischen Systems beschreibt. Diese Größe nimmt hierbei Werte an, die abwechselnd größer oder kleiner als ein bestimmter Mittelwert sind.“ [9]*

Eine bildhafte Darstellung von Schwingungen lässt sich am Beispiel einer Schaukel zeigen. Will ein Kind möglichst hoch hinaufschaukeln, so hat es zwei Möglichkeiten: Entweder lenkt der Vater die Schaukel zu Beginn weit aus und lässt das Kind ausschaukeln, oder das Kind holt im richtigen Moment Schwung und kommt so immer höher und höher.

Im ersten Fall findet die Bewegung in der Eigenfrequenz des Schaukel-Kind Systems statt. Durch die natürliche Dämpfung, sprich durch Reibung in den Schanieren und durch den Luftwiderstand, wird die Auslenkung/Amplitude der Schaukel immer kleiner bis sie schließlich zum Stillstand kommt.

Im zweiten Fall holt das Kind im richtigen Moment immer wieder Schwung und erzielt mit diesen oft kleinen Kräften, dass die Auslenkung der Schaukel immer größer wird. Hier findet die Anregung in der Eigenfrequenz des Systems statt, d. h. in Resonanz.

Mit jedem Mal Schwung holen wird hier immer mehr Energie in das System eingebracht, wodurch die Amplitude größer und größer wird. Diesen Vorgang bezeichnet man als Einschwingvorgang und endet, wenn der „Eingeschwungene Zustand“ erreicht wurde. Dieser stellt sich ein, wenn die Energie, welche durch die Dämpfung in andere Energieformen umgewandelt wird (=Dissipation), genau so groß ist wie die Energie, welche durch die Anregung eingebracht wird. Dabei wird hier die Dämpfung viskos, also geschwindigkeitsproportional, angenommen.

Berücksichtigt man theoretisch die Dämpfung nicht, so verlässt das System nie den Einschwingvorgang, wodurch die Amplituden unendlich groß werden. [13]

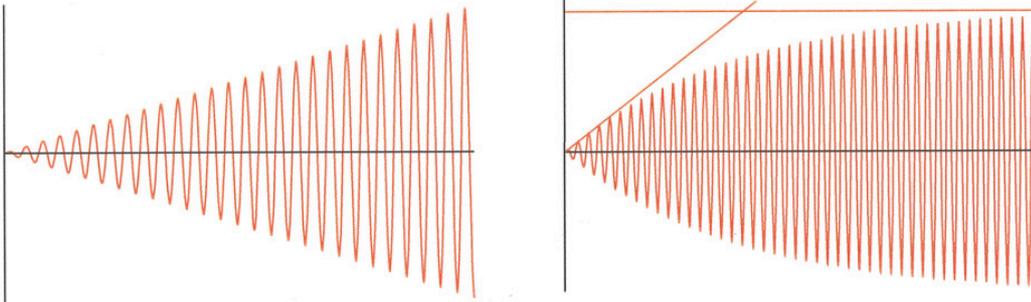


Abb. 2.1 Einschwingvorgang im Resonanzfall, links ohne Dämpfung ( $\zeta = 0$ ), rechts für die Dämpfung  $\zeta = 1\%$  [22]

## 1. 1 Gliederung der Schwingungen

Schwingungen werden in der Schwingungslehre grundsätzlich in deterministische Schwingungen und Zufallsschwingungen unterschieden, wobei unter ersterem die harmonischen und periodischen Schwingungen fallen. Lässt sich der zu erwartende Zeitverlauf einer deterministischen Schwingung bei Kenntnis des vorangegangenen Zeitverlaufes vorhersagen, so ist bei Zufallsschwingungen eine Aussage nur begrenzt und mit Hilfe von statistischen Methoden möglich.

### 1. 1. 1 Harmonische Schwingung

Eine harmonische Schwingung ist eine sinusförmige, periodische Funktion einer unabhängigen Variablen.

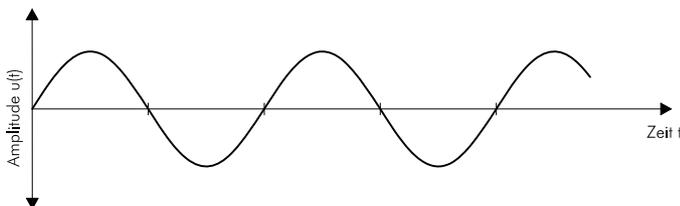


Abb. 2.2 harmonische Schwingung

### 1. 1. 2 Periodische Schwingung

Eine periodische Schwingung ist dadurch gekennzeichnet, dass sich der Verlauf nach einem bestimmten Zeitintervall (=Periode) wiederholt.

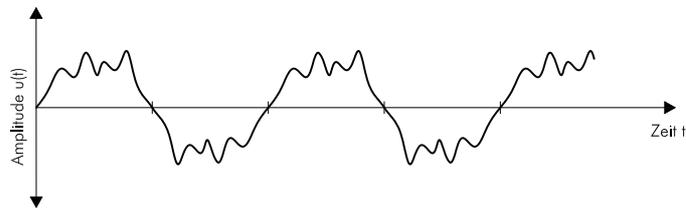


Abb. 2.3 periodische Schwingung

### 1. 1. 3 Zufallsschwingung

Anhand des Verlaufes einer Zufallsschwingung lässt sich der weitere Verlauf nicht genau bestimmen. Aussagen über ein mögliches Auftreten von bestimmten Amplituden ist nur anhand von Wahrscheinlichkeitsverteilungen möglich.

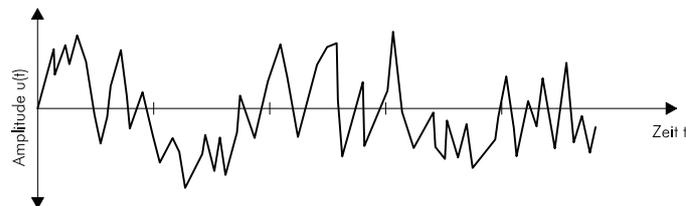


Abb. 2.4 Zufallsschwingung

## 1. 2 Grundbegriffe [8]

Anhand der harmonischen Sinusschwingung werden im Folgenden die wesentlichen Grundbegriffe angeführt, welche für die Beschreibung des Schwingungsverlaufes notwendig sind.

### Grundbegriffe

$t$	... Zeit [s]
$u(t)$	... zeitabhängige Amplitude [m]
$A$	... maximale Amplitude [m]
$T$	... Periode [s] (Zeit einer „vollständigen“ Schwingung)
$\omega$	... Kreisfrequenz [rad/s]
$\omega_0$	... Eigenkreisfrequenz [rad/s]
$f$	... Frequenz [Hz]; Kehrwert von $T$ (Anzahl der Schwingungen pro Sekunde)
$f_0$	... Eigenfrequenz [Hz]
$\Theta$	... Phasenwinkel [rad] (verschiebt die Schwingkurve entlang der Zeitachse)

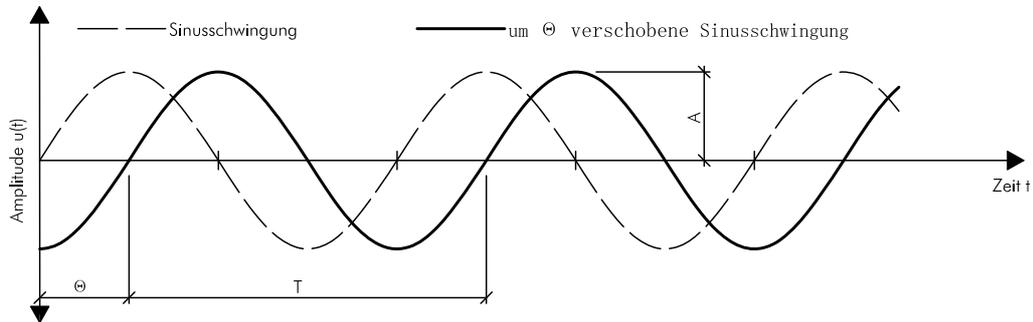


Abb. 2.5 Grundbegriffe anhand einer freien, ungedämpften Sinusschwingung [8] (bearbeitet)

## 2 Einmassenschwinger [9]; [15]

„Das einfachste schwingungsfähige System ist der Einmassenschwinger. Dieser besteht aus einer Masse  $m$ , einer Feder mit der Steifigkeit  $k$  und einem Dämpfer mit dem Dämpfungskoeffizienten  $c$  (...). Diese Systeme mit einem Freiheitsgrad werden auch als „single degree of freedom“-Systeme (SDOF) bezeichnet.“ [9] (siehe Abb. 2.6)

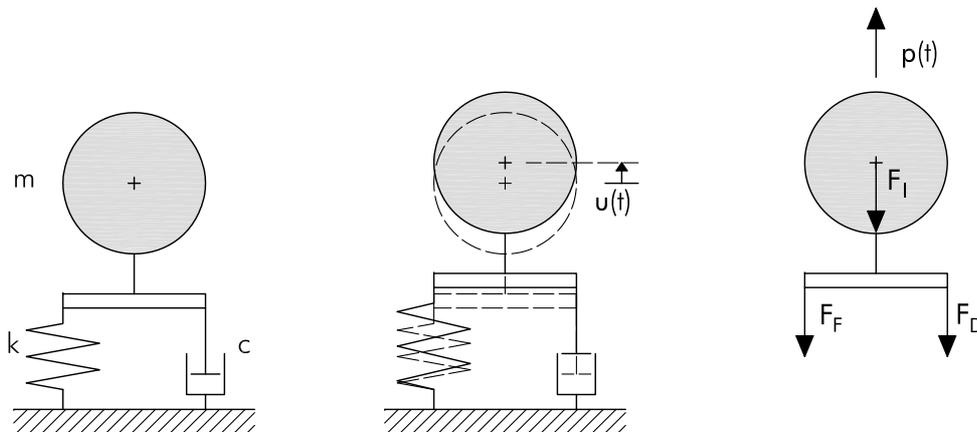


Abb. 2.6 Einmassenschwinger in Ruhelage, in ausgelenkter Position und mit Kraftkomponenten [9] (bearbeitet)

### Bezeichnungen

$m$	... Masse [kg]
$k$	... Federsteifigkeit [N/m]
$c$	... Dämpfungskonstante [N·s/m]
$u(t)$	... Verschiebung [m]
$p(t)$	... Belastungsfunktion [N]
$F_I$	... Trägheitskraft [N]
$F_F$	... Federkraft [N]
$F_D$	... Dämpfungskraft [N]

Ausgehend von Abb. 2.6 definiert sich das Gleichgewicht eines Einmassenschwingers nach Gl. [2.1]. Die angreifende Kraft wird hier durch die Funktion  $p(t)$  dargestellt.

$$F_I + F_D + F_F = p(t) \quad [2.1]$$

Setzt man in diese Gleichung folgende Ausdrücke ein,

$$F_I = m \cdot \ddot{u} \quad [2.2]$$

$$F_D = c \cdot \dot{u} \quad [2.3]$$

$$F_F = k \cdot u, \quad [2.4]$$

so erhält man die bekannte Schwingungsgleichung

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = p(t). \quad [2.5]$$

Die Dämpfungskraft  $F_D$  wird dabei viskos, d.h. geschwindigkeitsproportional angenommen [22].

Wird die Masse aus einer ausgelenkten Lage  $u(t=0)$  losgelassen und keine weitere Kraft eingebracht, so gilt mit der Anfangsbedingung  $p(t)=0$

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = 0. \quad [2.6]$$

Für die Lösung der Differenzialgleichung wird der Ansatz

$$u(t) = G \cdot e^{s \cdot t} \quad [2.7]$$

gewählt. Durch zweimaliges Ableiten von Gl. [2.7] und Einsetzen in Gl. [2.6] erhält man das Polynom

$$m \cdot s^2 \cdot G \cdot e^{s \cdot t} + c \cdot s \cdot G \cdot e^{s \cdot t} + k \cdot G \cdot e^{s \cdot t} = 0, \quad [2.8]$$

welches sich über die Division durch  $G \cdot e^{s \cdot t}$  und  $m$  und unter Verwendung der Abkürzung

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad [2.9]$$

zu

$$s^2 + \frac{c}{m} \cdot s + \omega_0^2 = 0 \quad [2.10]$$

umformen lässt.

## 2.1 Freie, ungedämpfte Schwingung

Geht man von einem ungedämpften System mit  $c = 0$  aus, so lässt sich Gl. [2.10] nach

$$s = \pm i \cdot \omega_0 \quad [2.11]$$

auflösen. Setzt man nun Gl. [2.11] in den Ansatz Gl. [2.7] ein, ergibt sich für die Lösung von Gl. [2.6] die Bewegungsgleichung

$$u(t) = C_1 \cdot e^{i \cdot \omega_0 \cdot t} + C_2 \cdot e^{-i \cdot \omega_0 \cdot t} \quad [2.12]$$

Diese beschreibt den zeitlichen Verlauf der Verschiebung und lässt sich mittels der Euler'schen Gleichung in

$$u(t) = B_1 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + B_2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad [2.13]$$

umformen. Bei einer konstanten Winkelgeschwindigkeit von  $\omega_0$  [rad/s], welche meist als Eigenkreisfrequenz bezeichnet wird, führt die Masse in Abb. 2.6 demnach eine harmonische Bewegung mit konstanter Amplitude aus. Unter Verwendung von Gl. [2.9] gelten für die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$ , die Eigenfrequenz  $f_0$  und die Schwingungsdauer  $T$  folgende Zusammenhänge:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad f_0 = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi}, \quad T = \frac{1}{f_0}.$$

## 2.2 Freie, gedämpfte Schwingung

Ungedämpfte Schwingungen bilden eine theoretische Grundlage, kommen in der Praxis jedoch nicht vor. Bei einem gedämpften System mit  $c \neq 0$  lautet die Lösung von Gl. [2.10]

$$s = -\frac{c}{2 \cdot m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2 \cdot m}\right)^2 - \omega_0^2}. \quad [2.14]$$

Je nach Größe der Konstante  $c$  kann der Wert unter der Wurzel null, negativ oder positiv ausfallen, wodurch sich drei typische Lösungen für  $s$  und  $u(t)$  ergeben.

- $c = c_c = 2 \cdot m \cdot \omega_0$       ... kritisch gedämpft
- $c > 2 \cdot m \cdot \omega_0$       ... überkritisch gedämpft
- $c < 2 \cdot m \cdot \omega_0$       ... unterkritisch gedämpft

Der Dämpfungskoeffizient  $c$  [N·s/m] lässt sich auch durch die Dämpfungszahl  $\zeta$  [-] ausdrücken, welche das Verhältnis aus vorhandener Dämpfung  $c$  zu kritischer Dämpfung  $c_c$  angibt. Die Dämpfungszahl wird auch als Lehr'sches Dämpfungsmaß bezeichnet und

in der Literatur zum Teil auch mit  $D$  oder  $\xi$  angegeben.

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2 \cdot m \cdot \omega_0} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{m \cdot k}} \quad [2.15]$$

Im Bauwesen handelt es sich überwiegend um unterkritisch gedämpfte Systeme, weshalb die kritische und überkritische Dämpfung nicht weiter behandelt werden. Demnach ergibt sich unter Verwendung der Lehr'schen Dämpfung für  $s$  die Lösung

$$s = -\zeta \cdot \omega_0 \pm \sqrt{(\zeta \cdot \omega_0)^2 - \omega_0^2} = -\zeta \cdot \omega_0 \pm i \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad [2.16]$$

Mit der Abkürzung

$$\omega_D = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad [2.17]$$

für die gedämpfte Eigenkreisfrequenz lässt sich  $s$  auf

$$s = -\zeta \cdot \omega_0 \pm i \cdot \omega_D \quad [2.18]$$

vereinfachen. Durch Einsetzen von Gl. [2.18] und Gl. [2.7] in Gl. [2.6] ergibt sich die Bewegungsgleichung

$$u(t) = e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot (C_1 \cdot e^{i \cdot \omega_D \cdot t} + C_2 \cdot e^{-i \cdot \omega_D \cdot t}) \quad [2.19]$$

bzw.

$$u(t) = e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot (B_1 \cdot \sin(\omega_D \cdot t) + B_2 \cdot \cos(\omega_D \cdot t)) \quad [2.20]$$

der freien gedämpften Schwingung.

Die Funktion  $e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot t}$  beschreibt dabei den Verlauf der Umhüllungsfunktion, welche sich in die abfallenden Punkte der maximalen bzw. steigenden Punkte der minimalen Amplituden legen lässt.

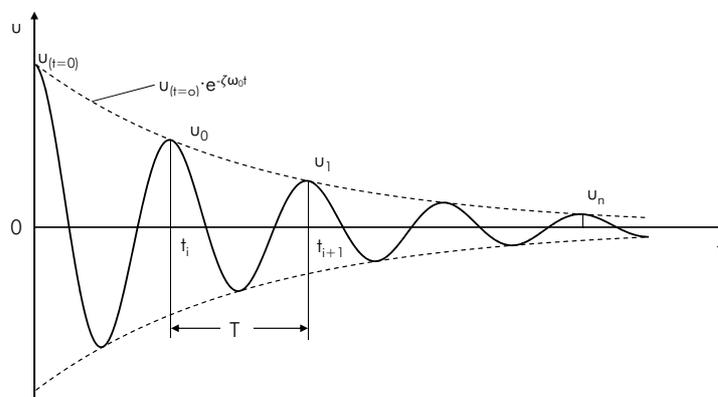


Abb. 2.7 freie Schwingung mit viskoser Dämpfung  $\zeta=10\%$  [15] (bearbeitet)

Ein weiteres Maß für die Dämpfung ist das logarithmische Dekrement  $\Lambda$  [-] (zum Teil auch mit  $\vartheta$  bezeichnet), welches neben dem Lehr'schen Dämpfungsmaß ebenfalls häufig Verwendung findet. Das logarithmische Dekrement lässt sich aus dem Größenunterschied zweier aufeinander folgender Amplituden berechnen und steht mit dem Lehr'schen Dämpfungsmaß im folgenden Zusammenhang:

$$\frac{u_i}{u_{i+1}} = \frac{e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot t}}{e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot (t+T)}} = e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot T} = e^{\Lambda}. \quad [2.21]$$

Daraus folgt

$$\Lambda = \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+1}}\right) = \zeta \cdot \omega_0 \cdot T = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}. \quad [2.22]$$

Für kleine Dämpfungen  $\zeta \ll 1$  kann anstelle von Gl. [2.22] auch die Näherung

$$\Lambda \approx 2 \cdot \pi \cdot \zeta \quad [2.23]$$

verwendet werden.

Nach Gl. [2.17] verringert sich die Eigenkreisfrequenz  $\omega_D$  eines gedämpften Systems gegenüber der Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  je nach Höhe des Dämpfungsmaßes. Bei Dämpfungen unter 10 % fällt dieser Unterschied jedoch vernachlässigbar gering aus, weshalb man im Allgemeinen mit der ungedämpften Eigenkreisfrequenz rechnen kann [9]. So ergibt sich für  $\zeta = 10\%$ :  $\omega_D / \omega = 0,995$  und für  $\zeta = 5\%$ :  $\omega_D / \omega = 0,998$ .

## 2.3 Ungedämpfte Schwingung mit harmonischer Anregung

Für das ungedämpfte System mit harmonischer Anregung lässt sich Gl. [2.5] zu

$$m \cdot \ddot{u} + k \cdot u = p_0 \cdot \sin(\Omega \cdot t) \quad [2.24]$$

vereinfachen. Die homogene Lösung  $u_h$  dieser Gleichung wurde schon in Abschnitt 2.1 für die ungedämpfte Eigenschwingung ermittelt:

$$u_h = B_1 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + B_2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad [2.25]$$

Für die partikuläre Lösung  $u_p$  wird die harmonische Funktion

$$u_p = C \cdot \sin(\Omega \cdot t) \quad [2.26]$$

als Ansatz verwendet. Die Ansatzfunktion von Gl. [2.26] und deren zweite Ableitung werden in Gl. [2.24] eingesetzt, woraus sich für C

$$C = \frac{p_0}{k - m \cdot \omega^2} = \frac{p_0}{k} \cdot \frac{1}{1 - \beta^2} \quad [2.27]$$

ergibt. Dabei ist  $\beta$  (je nach Literatur auch  $\eta$ ) das Verhältnis zwischen Erregerkreisfrequenz und Eigenkreisfrequenz:

$$\beta = \frac{\Omega}{\omega_0} \quad [2.28]$$

Durch die Addition von homogener und partikulärer Lösung ergibt sich die allgemeine Lösung aus Gl. [2.24] zu

$$u(t) = u_h + u_p = B_1 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + B_2 \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \frac{p_0}{k} \cdot \frac{1}{1 - \beta^2} \cdot \sin(\Omega \cdot t). \quad [2.29]$$

Um ein besseres Verständnis für die Bedeutung der einzelnen Terme zu erlangen, werden unter den Anfangsbedingungen  $u(t=0) = 0$  und  $\dot{u}(t=0) = 0$  die Konstanten  $B_1$  und  $B_2$  ermittelt. Dies bedeutet, dass sich das System zu Beginn in Ruhelage befindet und mit der harmonischen Belastung  $p(t) = p_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$  angeregt wird. Aus diesen Annahmen resultiert die Bewegungsgleichung

$$u(t) = \frac{p_0}{k} \cdot \frac{1}{1 - \beta^2} \cdot (\sin(\Omega \cdot t) - \beta \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)). \quad [2.30]$$

$\frac{1}{1} \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{4}$

Dabei bedeuten die Terme:

- 1 ... Einsenkung unter einer statischen Last  $p_0$
- 2 ... Verstärkungsfaktor der Einsenkung infolge harmonischer Anregungskraft
- 3 ... Bewegungskomponente mit gleicher Frequenz wie Erregerfrequenz  $\Omega$
- 4 ... Bewegungskomponente mit Eigenfrequenz, klingt bei Dämpfung ab

## 2. 4 Gedämpfte Schwingung mit harmonischer Anregung

Wird die Dämpfung bei harmonischer Anregung berücksichtigt, so gilt

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = p_0 \cdot \sin(\Omega \cdot t) \quad [2.31]$$

bzw.

$$\ddot{u} + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_0 \cdot \dot{u} + \omega_0^2 \cdot u = \frac{p_0}{m} \cdot \sin(\Omega \cdot t). \quad [2.32]$$

Die homogene Lösung von Gl. [2.32] entspricht der Bewegungsgleichung der gedämpften Eigenschwingung (siehe Gl. [2.20]):

$$u_h(t) = e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot (B_1 \cdot \sin(\omega_D \cdot t) + B_2 \cdot \cos(\omega_D \cdot t)) \quad [2.33]$$

Für den partikulären Anteil mit dem Ansatz

$$u_p(t) = G_1 \cdot \sin(\Omega \cdot t) + G_2 \cdot \cos(\Omega \cdot t) \quad [2.34]$$

lassen sich durch Einsetzen in Gl. [2.32] und unter Verwendung der Abkürzung  $\beta$  (siehe Gl. [2.28]) die nach Sinus- und Cosinusgliedern sortierten Konstanten  $G_1$  und  $G_2$  bestimmen:

$$G_1 = \frac{p_0}{k} \cdot \frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2} \quad [2.35]$$

$$G_2 = \frac{p_0}{k} \cdot \frac{-2 \cdot \zeta \cdot \beta}{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2} \quad [2.36]$$

Durch Einsetzen der Konstanten  $G_1$  und  $G_2$  in den Ansatz aus Gl. [2.32] ergibt sich für die partikuläre Lösung

$$u_p(t) = \frac{p_0}{k} \cdot \left[ \frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2} \cdot \sin(\Omega \cdot t) - \frac{-2 \cdot \zeta \cdot \beta}{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2} \cdot \cos(\Omega \cdot t) \right] \quad [2.37]$$

Addiert man die beiden Vektoren  $G_1$  und  $G_2$ , so lässt sich Gl. [2.37] auch zu der häufig verwendeten Schreibweise

$$u_p(t) = \frac{p_0}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2}} \cdot \sin(\Omega \cdot t - \theta) \quad [2.38]$$

umformen. Die Phasenverschiebung  $\theta$  lässt sich dabei nach

$$\theta = \arctan\left(\frac{2 \cdot \zeta \cdot \beta}{1 - \beta^2}\right), 0 \leq \theta \leq 180^\circ \quad [2.39]$$

berechnen. Diese drückt die Verschiebung zwischen Einwirkung und Schwingungsantwort aus.

Führt man nun die homogene (Gl. [2.20]) und partikuläre Lösung (Gl. [2.38]) zusammen, so ergibt sich die Bewegungsgleichung zu

$$u(t) = e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot (B_1 \cdot \sin(\omega_D \cdot t) + B_2 \cdot \cos(\omega_D \cdot t)) + \frac{p_0}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2}} \cdot \sin(\Omega \cdot t - \theta) \quad [2.40]$$

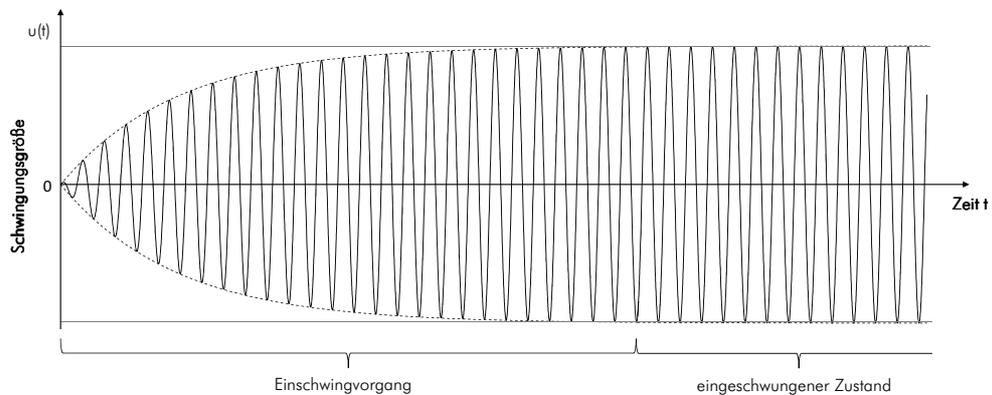


Abb. 2.8 Einschwingvorgang und eingeschwungener (stationärer) Zustand bei harmonischer Anregung des Einmassenschwingers [12] (bearbeitet)

Der homogene Anteil in Form der Eigenschwingung des Systems klingt in der Einschwingphase je nach Dämpfung mit der Zeit ab. Der partikuläre Anteil ist in der Einschwingphase ebenfalls vorhanden und nimmt immer mehr zu. Im eingeschwungenen Zustand bestimmt nur noch der partikuläre Anteil (Lastanteil) den Schwingvorgang des Systems. Der eingeschwungene oder auch stationäre Zustand ist dadurch gekennzeichnet, dass die nachfolgenden Schwingungen in Amplitude und Frequenz unverändert bleiben.

Der partikuläre Anteil der Bewegungsgleichung wird maßgeblich beeinflusst durch den mittleren Term, welcher als sogenannter Verstärkungsfaktor  $V$  (siehe Gl. [2.41]) bezeichnet wird und das Verhältnis zwischen Schwingungsamplitude und statischer Einsenkung unter  $p_0$  darstellt.

$$V = \frac{A}{p_0/k} = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \beta)^2}} \quad [2.41]$$

Befindet sich die Erregerfrequenz in der Nähe der Eigenfrequenz, so tritt bei  $\beta = \sqrt{1-2 \cdot \zeta^2}$  in Form einer maximalen Verstärkung Resonanz ein (siehe Abb. 2.9). Dieser Wert ergibt sich aus Ableitung und anschließender Nullsetzung von Gl. [2.41]. Der maximale Verstärkungsfaktor wird dann bei

$$V_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \zeta \cdot (1-\zeta^2)} \quad [2.42]$$

erreicht. Da im baupraktischen Fall äußerst geringe Dämpfungswerte erreicht werden, geht man bei  $\beta = 1$  vom Resonanzfall aus. Der maximale Verstärkungsfaktor in Gl. [2.42] resultiert dann zu

$$V_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \zeta} \quad [2.43]$$

und ist umgekehrt proportional zur Dämpfungszahl.

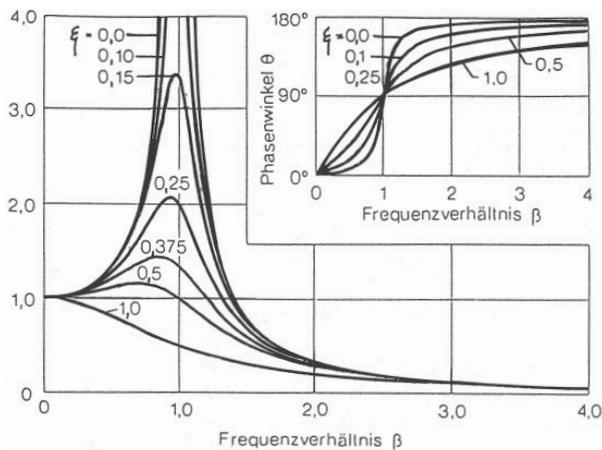


Abb. 2.9 Verstärkungsfaktor und Phasenverschiebung in Abhängigkeit zum Frequenzverhältnis für verschiedene Dämpfungsverhältnisse [9]

### 3 Dynamische Lasten im Bauwesen [9]

Die dynamischen Belastungen, die im Bauwesen auftreten, lassen sich nach der Charakteristik ihres zeitlichen Verlaufes gliedern.

#### 3.1 Harmonische Lasten

Als harmonischen Lastfall versteht man Einwirkungen, deren Kraftverlauf einer harmonischen Schwingung entsprechen (siehe Abschnitt 1. 1. 1) und über einen so langen Zeitraum angreifen, dass sich ein stationärer Schwingungszustand im Bauwerk bzw. Bauteil aufbauen kann. Anregungen dieser Art sind zum Beispiel:

- Maschinen mit rotierenden, nicht vollkommen ausgewuchteten Teilen
- Maschinen mit beabsichtigten Unwuchten.

#### 3.2 Periodische Lasten

Lastangriffe mit periodischem Verlauf (siehe Abschnitt 1. 1. 2) können gleich wie harmonische Lasten durch lange Einwirkungszeiträume einen stationären Schwingungszustand im Bauwerk herbeiführen. Beispiele für solche Lasten sind:

- menschliche Aktivitäten
- Maschinen mit mehreren Unwuchten
- Maschinen mit oszillierenden Teilen
- Maschinen mit regelmäßig stoßenden Teilen
- Wind (Anregung normal zur Windrichtung, zufolge Wirbelablösung)

### 3.3 Transiente Lasten

Der Verlauf einer transienten Last besitzt einen beliebigen Zeitverlauf ohne jegliche Periodizität (vergleichbar mit der Zufallschwingung in Abschnitt 1. 1. 3). Die Einwirkungsdauer ist ebenfalls beliebig. Diese Last resultiert zum Beispiel aus:

- Wind (Anregung in Windrichtung)
- Wasserwellen
- Erdbeben
- Schienen- und Straßenverkehr
- Bauarbeiten

### 3.4 Impulsartige Lasten

Eine transiente Last mit sehr kurzem Zeitverlauf wird impulsartige Last genannt. Aufgrund der kurzen Einwirkungsdauer werden jedoch andere Bauwerks- bzw. Bauteilsreaktionen hervorgerufen als dies bei den transienten Lasten der Fall ist. Anregungen dieser Art sind:

- Maschinen, welche Einzelstöße ausüben
- Bauarbeiten (z.B.: Erschütterungen im Nahbereich einer Sprengung)
- Aufprall von Fahrzeugen, Flugzeugen, Schiffen, Geschossen auf Bauwerke bzw. Bauteile
- Explosionen
- plötzlicher Ausfall tragender Teile

### 3.5 Personeninduzierte Lasten auf Wohnungsdecken

Nach [9] können zufolge menschlicher Aktivitäten folgende Lasten auftreten:

Periodische Lasten:

- Gehen
- Laufen
- Hüpfen
- Tanzen

Transiente bzw. impulsartige Lasten:

- Absprung vom Sprungturm
- Auftreffen auf Hallenboden
- Stoß gegen Wand

Für Wohnungsdecken gilt insbesondere das Gehen als relevante Einwirkung. Laufen und Tanzen sind aufgrund der geringen Abmessungen in Wohnräumen als Ausnahme zu erachten. Die Schrittfrequenz, als maßgeblicher Parameter der dynamischen Belastung, bewegt sich nach mehreren Untersuchungen im Bereich von 1,5 bis 2,5 Hz, mit einem Mittelwert von 2 Hz [5]. Der zeitliche Verlauf der Last beim Gehen wird, neben der Schrittfrequenz, mitunter von folgenden Parametern geprägt:

- Art des Aufsetzens des Fußes auf den Boden,
- Personengewicht,
- Schuhwerk und
- Beschaffenheit der Gehfläche.

Die typische Krafteinwirkung, die sich bei einem Fußauftritt ergibt, ist in Abb. 2.10 dargestellt. Der erste „Höcker“ des sattelförmigen Verlaufs entspricht dabei dem Auftreffen der Ferse, während das zweite Kraftmaximum durch das Abstoßen mit dem Fußballen erzeugt wird. In weiterer Folge berührt beim Gehen immer ein Fuß den Boden, weshalb sich die Kraftverläufe der einzelnen Schritte überlappen. Erhöht sich die Frequenz, so verschwindet diese Ausprägung von zwei Kraftspitzen zunehmend, bis sich beim Laufen nur noch ein Kraftmaximum mit verkürzter Einwirkungsdauer einstellt. Ständiger Bodenkontakt, wie es beim Gehen der Fall ist, ist beim Laufen nicht mehr vorhanden.

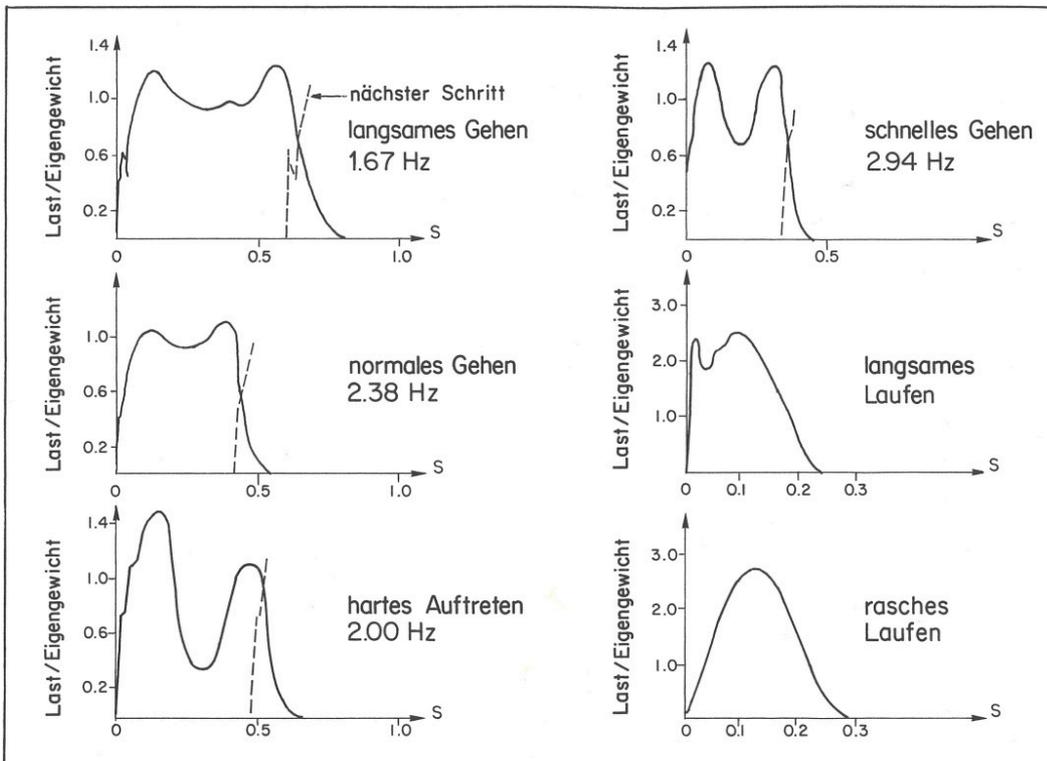


Abb. 2.10 zeitlicher Verlauf der dynamischen Last für verschiedene Fortbewegungsarten [5]

# Menschliche Wahrnehmung

Da von auftretenden Schwingungen nur die Amplituden messtechnisch und davon die Eigenfrequenzen und Dämpfungen rechnerisch bestimmt werden können, gilt es, das Ergebnis der subjektiven, menschlichen Wahrnehmung auf eine oder mehrere dieser Größen zu beziehen. Die so gewonnenen Zusammenhänge ermöglichen es somit, bei einer rechnerischen Vorbemessung von schwingungsfähigen Deckensystemen abzuschätzen, ob es infolge auftretender Schwingungen zu einer Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit kommen kann. Diese Korrelation von subjektiver Wahrnehmung und messbaren Schwingungsparametern entzieht sich jedoch einer einfachen Lösung.

## 1 Forschungsergebnisse

Die folgenden Abschnitte sollen einen Überblick zu der Erforschung der menschlichen Wahrnehmung von Schwingungen ermöglichen. Chronologisch gereiht beschreiben sie die Entwicklung und den Fortschritt der Forschung auf diesem Gebiet. Inhaltlich wurde im Wesentlichen auf Themen in Verbindung mit Wohnungsdecken und deren Einflussfaktoren auf die menschliche Empfindung eingegangen.

### 1.1 Reiher und Meister (aus [14])

Bei den Untersuchungen von Reiher und Meister (1931) wurden die Probanden 5 Minuten lang konstanten Schwingungen ausgesetzt. Die Anregungen wurden bei stehender und liegender Position jeweils in vertikaler und horizontaler Richtung ausgeführt, wonach die Testpersonen ihre Empfindungen gemäß sechs festgelegter Klassen mitteilten.

- nicht spürbar
- schwach spürbar
- gut spürbar
- stark spürbar, lästig

- unangenehm, bei längerer Dauer bedingt schädlich
- sehr unangenehm, bereits bei kurzer Dauer unbedingt schädlich

Es konnte festgehalten werden, dass die vertikalen Schwingungen gegenüber den horizontalen intensiver wahrgenommen wurden. Die Ergebnisse für die vertikalen Schwingungsanregungen bei stehenden Menschen sind in Abb. 3.1 zusammen mit den Grenzlinien dargestellt.

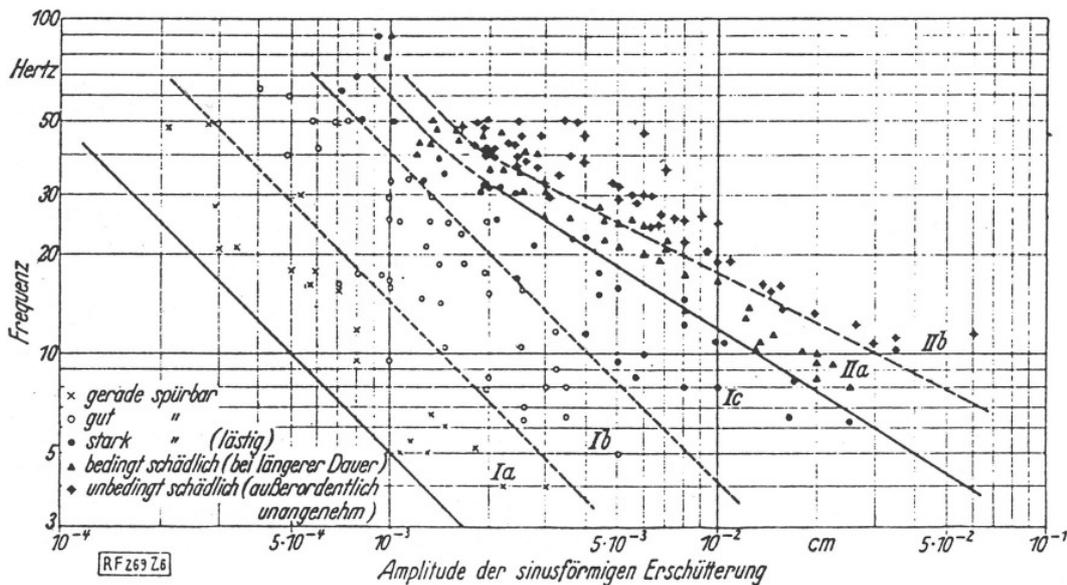


Abb. 3.1 Bereiche verschiedener Empfindungsstärken stehender Menschen gegen Vertikalschwingungen (aus [14])

## 1.2 Lenzen (aus [23])

Lenzen untersuchte 1966 das Schwingungsverhalten und die menschliche Wahrnehmung in Kombination mit Stahl-Beton-Verbunddecken und beobachtete, dass die Dämpfung einen wesentlichen Einfluss auf die Wahrnehmung von transienten Schwingungen hat. Während die Variation von Frequenz und Amplitude einen geringen Wahrnehmungsunterschied erzielte, war eine Schwingung, welche durch entsprechende Dämpfung innerhalb von fünf Zyklen auf ein unerhebliches Niveau reduziert wurde, kaum wahrnehmbar. War die Schwingung jedoch durch geringe Dämpfung nach mehr als zwölf Zyklen noch nicht abgeklungen, so waren die Reaktionen der Testpersonen vergleichbar mit jenen bei stationären Schwingungen.

## 1.3 Wiss und Parmelee (aus [14], [23])

Wiss und Parmelee (1974) verwendeten für ihre Versuche transiente Schwingungen und führten für die Bewertung, ähnlich Reiher und Meister, fünf Kategorien von „nicht spürbar“ bis „heftig“ ein. Bei stehender Position der Testpersonen

(insgesamt 40 Teilnehmer) wurden diese Frequenzen von 2,5 Hz bis 25 Hz und Dämpfungen von  $\zeta = 1\%$  bis 16% ausgesetzt, was den Bereich üblicher Holzdecken im Wohnbau entspricht. Die maximale Dauer einer Schwingung war mit fünf Sekunden begrenzt.

Die Ergebnisse wurden unter Verwendung verschiedener mathematischer Modelle untersucht. Werden die fünf Bewertungskategorien mit eins beginnend bei „nicht spürbar“ aufsteigend nummeriert, so lässt sich die Bewertungsklasse R einer Decke mit folgender Formel am günstigsten annähern:

$$R = 2,156 \cdot \left( \frac{f \cdot u_{\max}}{\zeta^{0,217}} \right)^{0,265} \quad [3.1]$$

mit

- R ... Bewertungsklasse [-]
- f ... Frequenz [Hz]
- $u_{\max}$  ... maximale Amplitude (Auslenkung) [mm]
- $\zeta$  ... Lehr'sches Dämpfungsmaß [-].

Stellt man diese Funktion im logarithmischen Maßstab dar, so ergibt sich eine lineare Abhängigkeit des Produktes  $f \cdot u_{\max}$  von der Dämpfung  $\zeta$  (siehe Abb. 3.2).

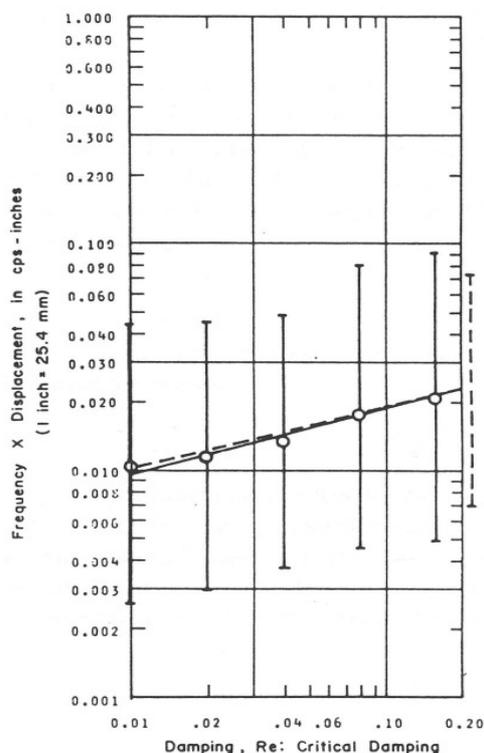


Abb. 3.2 Abhängigkeit des Produktes  $f \cdot u_{\max}$  von der Dämpfung für den kaum spürbaren Bereich ( $R = 2$ ) (aus [14])

Dargestellt nach der Schwinggeschwindigkeit  $v$  [mm/s] ergibt sich Gl. [3.1] zu

$$v = 0,3459 \cdot R^{3,774} \cdot \zeta^{0,217} \quad [3.2]$$

In einer zusätzlichen Versuchsserie konnte kein signifikanter Unterschied in der Wahrnehmung zwischen sitzender und stehender Position festgestellt werden.

Kreuzinger und Mohr [14] weisen darauf hin, dass durch die subjektive Bewertung der verschiedenen Testpersonen ein großer streuender Bereich innerhalb der jeweiligen Bewertungsklassen auftritt (vgl. Abb. 3.2).

### 1.4 Allen und Rainer (aus [14])

Allen und Rainer (1976) führten unter Berücksichtigung der Dämpfung Beurteilungen des Schwingungsverhaltens von weit gespannten Decken aus Stahl, Stahlbeton und Stahl-Beton-Verbund durch. Dabei wurden Eigenfrequenzen zwischen 2,75 bis 16 Hz festgehalten, wobei 70 % der Decken Eigenfrequenzen unter 8 Hz und 30 % unter 6 Hz aufwiesen. Bei der Auswertung der Messdaten zeigte sich wiederum, dass die Frequenz als alleiniges Beurteilungskriterium im Bezug auf die Wahrnehmung nicht ausreicht. Als Ergebnis der Beurteilungen resultierte das in Abb. 3.3 dargestellte Bemessungsdiagramm. Als begrenzende Größe für die jeweilige Frequenz dient dabei, unter Berücksichtigung der Dämpfung, der Maximalwert der Beschleunigung (=Scheitelwert) aus der Anregung durch heel-drop (siehe Kapitel 4. 1. 1. 5 heel-drop) bzw. der Mittelwert der Maxima einer stationären Schwingung.

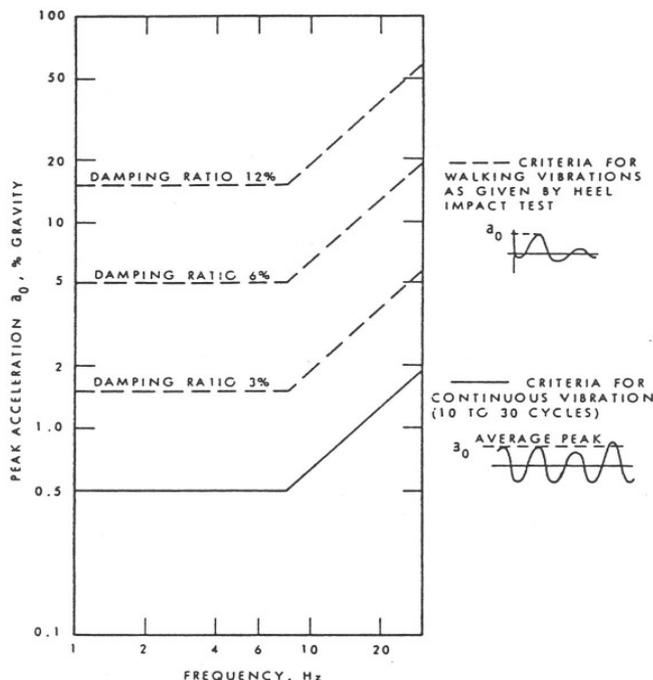


Abb. 3.3 Grenzbeschleunigung für Deckenschwingungen von Wohnhäusern, Büros und Schulgebäuden (aus [14])

„Diese Bemessungsregeln gelten nicht für leichte Decken mit kurzen Spannweiten.“  
 ([Allen, D. E., Rainer, J. H.: *Vibration criteria for long-span floors*, 1976] zitiert in [14])

In Abb. 3.3 ist erkennbar, dass ab einer Eigenfrequenz des Systems von 8 Hz die Schwingbeschleunigung in zunehmendem Maß toleriert wird. In diesem Zusammenhang hält Allen fest: „Im Frequenzbereich von 3 bis 8 Hz werden gleiche Empfindungen gleichen Beschleunigungen zugeordnet, während über 8 Hz die Schwinggeschwindigkeit maßgebend wird.“

([Allen, D. E.: *Vibrational behavior of long-span floor slabs*, 1974] zitiert in [14])

Weiters zeigen die Erfahrungen, dass höhere Eigenformen nicht berücksichtigt werden müssen, da sie sehr schnell abklingen. Zudem belegen die vorgeschlagenen Bewertungskriterien für weitgespannte Decken, dass „...die Dämpfung und die Plattendicke (und damit das Gewicht) maßgebend für die Verminderung von störenden Deckenschwingungen sind.“ [14]

## 1.5 Rasmussen (aus [14])

Symptome, welche beim Menschen durch Schwingungen mit definierten Frequenzen verursacht werden, sind bei Rasmussen (1982) angegeben (siehe Tab. 3.1). Daraus geht hervor, dass der Rumpf von tieferen Frequenzen (4 - 8 Hz) beeinflusst wird, während der Kopf und die Gliedmaßen bei höheren Frequenzen Symptome zeigen, was durch Resonanzerscheinungen erklärbar ist.

Symptome	Frequenzbereich [Hz]
Allgemeines Unwohlsein	4 - 9
Symptome im Kopfbereich	13 - 20
„lower jaw symptoms“	6 - 8
Beeinflussung der Sprache	13 - 20
„Knoten im Hals“	12 - 16
Schmerzen in der Brust	5 - 7
Unterleibsschmerzen	4 - 10
Harndrang	10 - 18
Anwachsende Muskelanspannung	13 - 20
Beeinflussung der Atembewegungen	4 - 8
Muskelanspannung	4 - 9

Tab. 3.1 auftretende Symptome bei Menschen, welche Schwingungen ausgesetzt sind (aus [14])

Neben der Frequenzangabe findet sich keine Information über die Amplituden der Schwingungsgrößen (Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit, Schwingweg). Dass das Wohlbefinden des Menschen jedoch nicht allein von der Frequenz, sondern auch von der Amplitudengröße und bei transienten Schwingungen von der Ausschwingdauer (Dämpfung) abhängig ist, konnte bei den bereits angeführten Untersuchungen aufgezeigt werden.

## 1. 6 Ohlsson [17], [18]

Ohlsson setzt sich seit 1978 mit Schwingungen und deren Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Menschen auseinander. Nach Ohlsson (1995) [18] sind menschliche Reaktionen auf Schwingungen subjektiv und werden von vielen unterschiedlichen Parametern beeinflusst. Dabei gelten folgende Beziehungen, welche für die meisten Situationen zutreffen:

*„Das menschliche Empfinden gegenüber Schwingungen*

- *ist abhängig von der Schwingbeschleunigung bei Frequenzen von weniger als etwa 8 Hz,*
- *ist abhängig von der Schwinggeschwindigkeit bei Frequenzen von mehr als etwa 8 Hz,*
- *hat, wie das subjektive Empfinden der Lautstärke, logarithmischen Charakter,*
- *nimmt mit der Schwingdauer zu,*
- *nimmt ab mit der Nähe zur und dem Bewusstsein über die Schwingursache und*
- *nimmt mit zunehmender Körpertätigkeit ab.“ [18]*

## 1. 7 Chui (aus [23])

Chui (1987) untersuchte anhand von sechs Holzdecken mit unterschiedlichen Schwingungseigenschaften den Zusammenhang der Wahrnehmung mit dem gemessenen Effektivwert  $a_{\text{rms}}$  der Beschleunigung (siehe Abschnitt 2) nach einem heel-drop (siehe Kapitel 4. 1. 1. 5 heel-drop). Die Decken entsprachen dem damaligen Stand der Technik und wurden mit unterschiedlichen Spannweiten von 3,6 bis 3,92 m ausgeführt. Aus den Untersuchungen wurde geschlossen, dass die unbewerteten Effektivwerte der Schwingbeschleunigung, welche in der Praxis auftreten, zwischen 0,1 und 0,8  $\text{m/s}^2$  liegen und dass die menschliche Wahrnehmung mit diesem gemäß Abb. 3.4 korreliert. Es wurde ebenfalls festgehalten, dass die Festlegung von Grenzwerten in Bezug auf die menschliche Wahrnehmung äußerst schwierig ist, dennoch sollte ein Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung  $a_{\text{w,rms}}$  von 0,45  $\text{m/s}^2$  nicht überschritten werden.

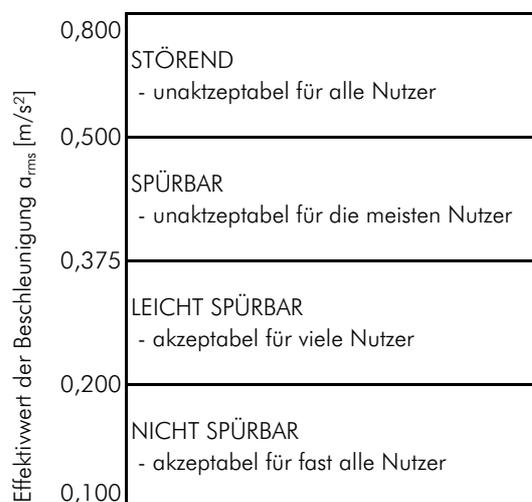


Abb. 3.4 menschliche Reaktion auf verschiedene Effektivwerte der Beschleunigung nach Chui (aus [23]) (bearbeitet)

## 1. 8 Kreuzinger und Mohr [14]

In Bezug auf die subjektive Wahrnehmung von Schwingungen merken Kreuzinger/Mohr folgendes an:

*„Eine Person wird Deckenschwingungen auch aufgrund ihres persönlichen Verhältnisses zum Bauwerk und zur Aktivität unterschiedlich bewerten. Es besteht ein Unterschied darin, ob der Empfänger im engen Bezug zum Anreger (z.B. Zuschauer oder Aktiver bei der Gymnastik) steht oder sich durch den Anreger eher gestört fühlt (z.B. Nachbar).“* [14]

An anderer Stelle wird angemerkt, dass bei niedrigen Eigenfrequenzen der Decke nur geringe Schwingungsgrößen toleriert werden, zusätzlich aber auch andere Probleme, wie eine leichtere Anregbarkeit (führt zu größeren Schwingungsamplituden), sich negativ auswirken.

Für die subjektive Bewertung von gemessenen Decken verwenden Kreuzinger/Mohr eigene Bewertungskriterien gemäß Tab. 3.2.

Beurteilung/ Note	in Worten	
	1	Schwingungen kaum spürbar
2	Schwingungen spürbar, wenn man sich darauf konzentriert	nicht störend
3	Schwingungen (und/oder Vibrationen) spürbar	z.T. störend
4	Schwingungen (und/oder Vibrationen) deutlich spürbar	störend/unangenehm

Tab. 3.2 subjektive Bewertungskriterien nach Kreuzinger/Mohr [14]

## 1. 9 Alvis (aus [23])

Alvis (2001) führte Analysen von Messdaten verschiedener Decken samt den zugehörigen Schwingungsbewertungen von Versuchspersonen durch. Dabei konnte er im Rahmen seiner Untersuchungen keine allgemeingültige mathematische Korrelation zwischen menschlicher Empfindung und Messgrößen wie Scheitelwert der Beschleunigung, frequenzbewerteter Scheitelwert der Beschleunigung, Effektivwert der Beschleunigung, erste Eigenfrequenz oder Produkt aus erster Eigenfrequenz und Scheitelwert der Beschleunigung feststellen. Die geringe Übereinstimmung von den Messdaten mit der Schwingungswahrnehmung wurde teilweise damit begründet, dass an verschiedenen Positionen andere Frequenzen aus höheren Eigenformen stärker wahrgenommen werden. Demzufolge wurde vorgeschlagen, die Beurteilung von Schwingungen der Decke in verschiedenen Bereichen vorzunehmen und bei starker Präsenz von Eigenfrequenzen, welche höher als die erste sind, FEM-Berechnungen anstelle von Handrechnungen durchzuführen.

## 1. 10 Ljunggren und Ljunggren et al. (aus [23])

Von Ljunggren (2006) und Ljunggren et al. (2007) wurden Untersuchungen durchgeführt, welche die Empfindung von Schwingungen mit Mehrfachfrequenzen darstellen sollen. Dafür wurden Probanden auf einen Stuhl gesetzt, welcher sich auf einer sehr steifen Holzplatte mit Eigenfrequenzen außerhalb des untersuchten Bereichs befand. Diese Platte wurde mit Hilfe eines Shakers kontinuierlich mit einer Frequenz von 8 Hz angeregt. Zusätzlich zu der Grundschiwingung wurde in weiterer Folge eine zusätzliche Schwingung hinzugefügt. Diese zusätzliche Schwingung wurde jeweils in fünf verschiedenen Frequenzen mit wiederum jeweils fünf verschiedenen Amplituden alterniert. Es wurde festgestellt, dass die Empfindlichkeit gegenüber Schwingungen dann deutlich anstieg, wenn eine zweite Frequenzkomponente hinzugefügt wurde. Eine verstärkte Wahrnehmung bei sehr geringen Frequenzunterschieden wird dabei in Zusammenhang mit auftretenden Schwebungseffekten (siehe Kapitel 6. 3 Schwebungen) begründet. Es wurde auch festgestellt, dass sich die Personen tendenziell durch eine Erhöhung der Amplitude mehr gestört fühlten als durch eine Erhöhung der Frequenz.

Aus diesen Zusammenhängen wurde gefolgert, dass eine Betrachtung der höheren Eigenfrequenzen für die Bemessung von Decken notwendig ist, da diese die Schwingungswahrnehmung wesentlich beeinflussen. Als Ergebnis der Analysen entwickelte Ljunggren Berechnungsmodelle, welche die Bestimmung von unangenehmen Schwingungen ermöglichen sollen (siehe Abb. 3.5).

Sinusoidal case:  
$$Annoyance = -1.26 + 0.39 \cdot \textit{Weighted total amplitude}$$

Multiple frequency case:  
$$Annoyance = -3.17 + 0.43 \cdot \textit{Weighted total amplitude} + 0.24 \cdot \textit{Fundamental frequency}$$

Where *amplitude* is given in  $\text{mm/s}^2$  rms and *frequency* in Hz.  
Frequency weighting,  $W_m$ , according to ISO 2631-2 2003.

Interpretation:    If  $Annoyance \leq 4$ , the floor is acceptable  
                          If  $Annoyance > 4$ , the floor is unacceptable

Abb. 3.5      Berechnungsmodelle für die Bestimmung unangenehmer Schwingungen nach Ljunggren (2006) (aus [23])

## 2      ISO 2631

Die ISO 2631 „Guide for the Evaluation of Human Exposure to Vibration“ war eine der ersten Versuche, die Empfindlichkeit des Menschen in Bezug auf niederfrequente Schwingungen in Form eines internationalen Standards normativ festzuhalten. In der ersten Veröffentlichung von 1974 war diese Norm primär auf die Beurteilung von Dauerschwingungen in der Industrie und in Fahrzeugen ausgelegt. Für die Ausgabe aus dem Jahr 1978 wurden jedoch mehrere Änderungen vorgenommen, um weitere Schwingungssituationen zu inkludieren. [17]

In der Veröffentlichung aus dem Jahr 1989 konnte dem Teil 2 der ISO 2631, welcher als Ergänzung für Schwingungen in Gebäuden herausgegeben wurde (Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 - 80 Hz)), die sogenannte „Basiskurve“ (siehe Abb. 3.6) entnommen werden. Diese bildete die sogenannte Wahrnehmbarkeitsgrenze des Menschen für vertikale Schwingungen bezogen auf die Schwingbeschleunigung ab. In der aktuellen Fassung von 2003 ist diese „Basiskurve“ für die Beurteilung der Wahrnehmbarkeitsgrenze nicht mehr enthalten. Die Begründung diesbezüglich lautet:

*„Richtwerte, bei deren Überschreitung ungünstige Reaktionen aufgrund der Gebäudeschwingungen auftreten könnten, sind nicht mehr enthalten, da ihr möglicher Bereich zu groß ist, um in einer Internationalen Norm wiedergegeben zu werden.“ [4]*

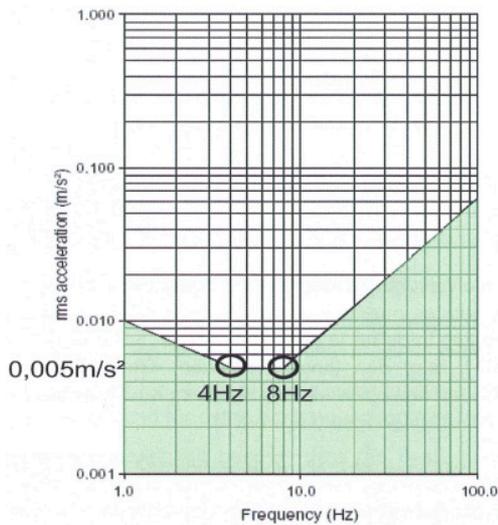


Abb. 3.6 „Basiskurve“ der ISO 2631-2:1989 (aus [22])

In der erwähnten Letztfassung der ISO 2631 wird der relevante Frequenzbereich für Gebäudeschwingungen auf 1 bis 80 Hz festgelegt. Für die Ermittlung von bewerteten Schwingbeschleunigungen und Schwinggeschwindigkeiten werden zudem frequenzabhängige Bewertungskurven ( $W_m$ ...positionsunabhängig) angegeben. Anhand der Gewichtung in den Bewertungskurven (siehe Abb. 3.7) ist zu erkennen, dass Schwingbeschleunigungen mit einer Frequenz bis ca. 8 Hz stärker berücksichtigt werden, was hingegen bei den Schwinggeschwindigkeiten im Frequenzbereich von 8 bis ca. 63 Hz zutrifft.

Für Vergleiche von unterschiedlichen Messungen wird in der ÖNORM ISO 2631-2:2007 empfohlen, den Effektivwert der Schwinggrößen (Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit) zu verwenden, welcher sich nach Gl. [3.3] berechnen lässt.

$$a_{w, \text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad [3.3]$$

mit

- $a_w(t)$  zeitabhängige Größe der Schwingbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ;  $\text{mm/s}^2$ ]  
(oder Schwinggeschwindigkeit [ $\text{m/s}$ ;  $\text{mm/s}$ ])
- $T$  Dauer, über welche der Effektivwert gebildet wird [s]

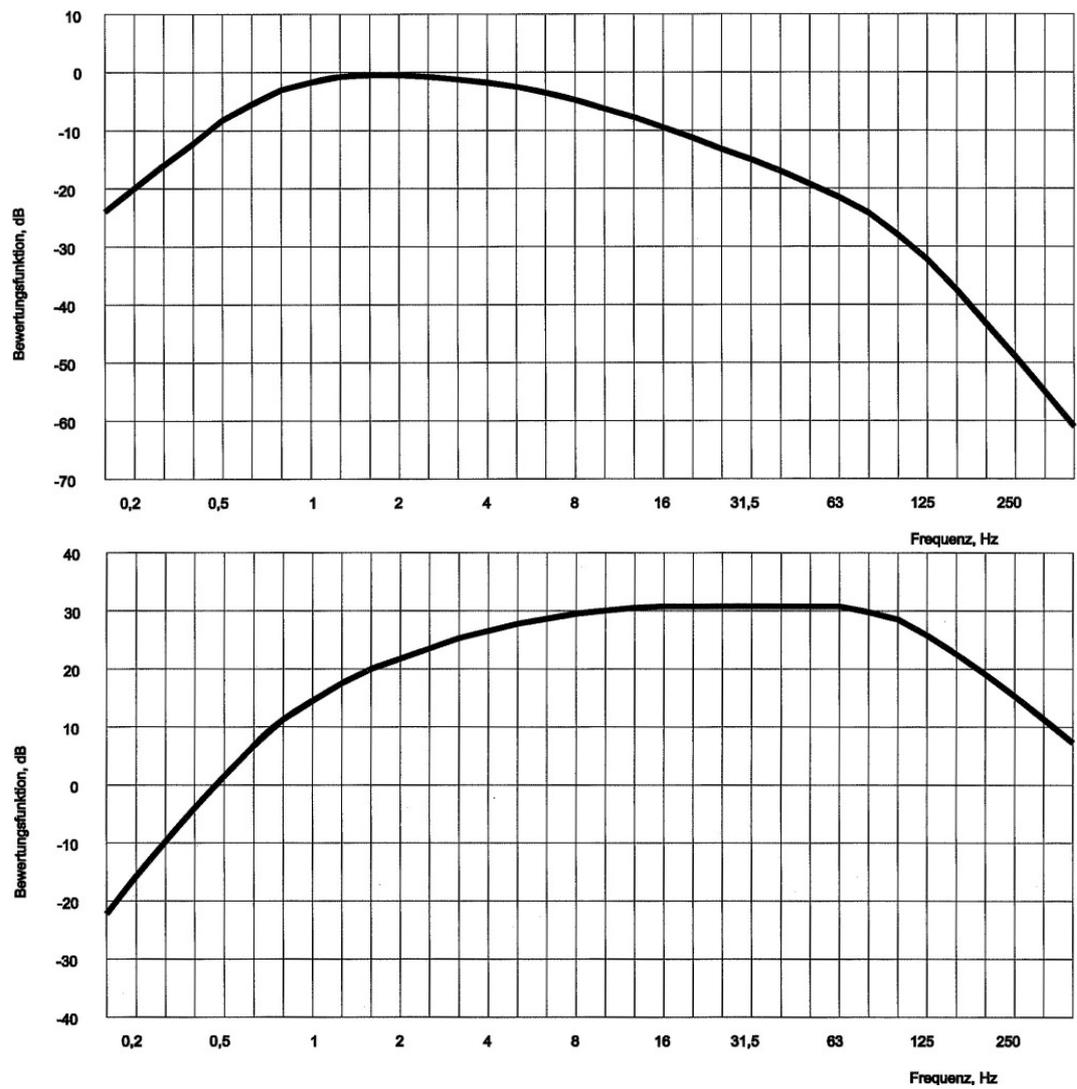


Abb. 3.7 Bewertungsfunctionen  $W_m$  für Beschleunigung (oben) und Geschwindigkeit (unten) als Einganggröße (schematisch) [4]

### 3 Zusammenfassung

Aus den vorgestellten Forschungsarbeiten und der normativen Regelung lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen:

Das menschliche Empfinden gegenüber Schwingungen

- ist abhängig von der Schwingbeschleunigung bei Frequenzen von weniger als etwa 8 Hz,
- ist abhängig von der Schwinggeschwindigkeit bei Frequenzen von mehr als etwa 8 Hz,
- hat, wie das subjektive Empfinden der Lautstärke, logarithmischen Charakter,
- nimmt mit der Schwingdauer zu,
- nimmt ab mit der Nähe zur und dem Bewusstsein über die Schwingursache,
- nimmt mit zunehmender Körpertätigkeit ab,
- nimmt mit dem Vorhandensein einer zweiten Frequenz zu,
- ist umso stärker, je geringer der Abstand zwischen zwei überlagernden Frequenzen ist (Aufkommen von Schwebungen) und
- kann, je nach Position, von höheren Eigenfrequenzen als der ersten beeinflusst werden.

# Versuchstechnik

Die angeführten Anregungsarten für die Durchführung von Versuchen und die darauf folgende Auswertung von Schwingungsparametern wie Eigenfrequenzen und Dämpfungsmaße wurden aus Teilen der Schwingungslehre, der Messtechnik und Forschungsarbeiten zu dynamischen Untersuchungen von Holzdecken erarbeitet. Diese Informationen bilden in weiterer Folge die Grundlage für die Messkonfiguration, die Messdurchführung und die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten aus dem Bauvorhaben `_massive_living`.

## 1 Versuchstechnische Bestimmung von Systemparametern

### 1.1 Anregungsarten

Um die dynamischen Eigenschaften von Wohnungsdecken bestimmen zu können, muss diese einer gezielten Anregung ausgesetzt werden. Anhand der gemessenen Schwingungsantwort lassen sich Parameter wie Schwingungsgrößen, Eigenfrequenzen und Dämpfungen ableiten. Je nachdem, welche Parameter primäres Ziel der Messungen sind und welche Auswertungsmethoden zur Anwendung kommen, wurden in der Versuchstechnik verschiedene Formen der Anregung entwickelt.

#### 1.1.1 Nullmessung

Bei dieser Messung werden die Schwingungen der Decke ohne zusätzliche Anregung aufgezeichnet. Beabsichtigtes Ergebnis dieses Messvorgangs sind die Eigenfrequenzen.

Bei Kreuzinger/Mohr [14] führte diese Messung, im Vergleich zu anderen Anregungsarten, in einigen Fällen zu eindeutigen Frequenzspektren, jedoch konnte bei den meisten Objekten, welche im Rahmen der Forschungsarbeit untersucht wurden, die erste Eigenfrequenz nicht eindeutig festgestellt werden.

### 1. 1. 2 Faustschlag von unten

Regt man die Decke von der Unterseite mit einem Faustschlag an, so lassen sich Eigenfrequenzen über 20 Hz gut anregen [7]. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass sich für die Anregung keine Person auf der Decke befindet, die durch ihre Masse die Eigenfrequenzen verringert.

### 1. 1. 3 Impulshammer

Der Impulshammer ist ein modifizierter Hammer, dessen Gewicht und damit die Höhe des Impulses durch anbringbare Gewichte adaptiert werden kann. Für die Messung des eingebrachten Impulses befindet sich zwischen der Masse und dem Schlagdorn ein Kraftsensor, mit dessen Hilfe die Dauer und Größe des Impulses aufgezeichnet werden kann. Die Anwesenheit einer Person auf der Decke ist obligat, jedoch ist zu beachten, dass für eine Anregung in der Mitte Hilfskonstruktionen notwendig sind, welche die anregende Person tragen, sofern deren Lasteinfluss auf der Decke unerwünscht ist. Vor allem bei in-situ-Messungen ist dies mitunter nicht leicht zu bewerkstelligen.

### 1. 1. 4 Auslenkung

Für die Art der Anregung wird der Decke durch das Anbringen einer Last eine definierte Auslenkung aufgezwungen. Durch plötzliche Entlastung wird die Decke in Schwingung versetzt, welche als Folge der Dämpfung abklingt. Dies kann z.B. durch Aufhängen einer Last an der Unterseite der Decke erfolgen. Verbunden durch einen Stahldraht, kann dieser dann mit entsprechendem Werkzeug durchtrennt werden. Für die Messung ist es nicht notwendig, dass sich eine Person auf der Decke befindet, die Einfluss auf die Eigenfrequenz oder Dämpfung haben könnte.

Diese Methode führt zwar zu „...reproduzierbaren Ergebnissen, ist jedoch für in-situ-Messungen nicht geeignet.“ [26]

### 1. 1. 5 heel-drop

Der heel-drop wird verwendet, um Messungen zufolge Impulse mit kürzerer Einwirkungs-dauer zu generieren. Desto kürzer der Impuls, desto breiter ist das angeregte Frequenzspektrum. Für den heel-drop stellt sich die anregende Person auf die Zehenballen und lässt sich auf die Fersen fallen. Die Knie sollten bei dieser Anregungsart ganz leicht angewinkelt bleiben (siehe Abb. 4.1).



Abb. 4.1 anregende Person vor (links) und nach (rechts) einem heel-drop

Beim heel-drop werden Impulse erzeugt, die etwa zwischen 68 und 85 N·s liegen (vgl. [14]). Nach den Erfahrungen von Kreuzinger/Mohr [14], Fitz [7] und Winter/Hamm/Richter [26] ist der heel-drop innerhalb einer Messreihe relativ gut reproduzierbar und erzeugt gut auswertbare Messschriebe. Vor allem die Eigenfrequenzen bis ca. 30 Hz und Dämpfungen (gutes Ausschwingverhalten; siehe Abschnitt 1. 4. 1) lassen sich anhand dieser Daten gut bestimmen. Bei leichten Decken kann diese Anregung zu falschen Ergebnissen führen, da aufgrund der großen Beschleunigungen der ständige Kontakt der Messaufnehmer zur Decke nicht mehr sichergestellt werden kann.

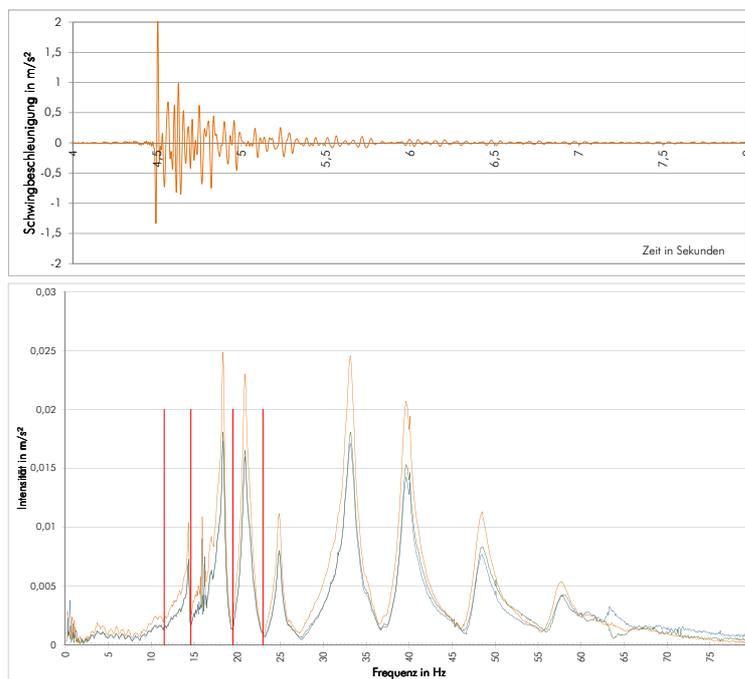


Abb. 4.2 zeitlicher Verlauf der Beschleunigung (oben) und zugehöriges Frequenzspektrum (unten) eines heel-drops

### 1. 1. 6 Sackabwurf

Ein mit Sand gefüllter Sack mit definiertem Gewicht wird aus bestimmten Höhen fallen gelassen und der entstehende Impuls gemessen. Ein Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, durch die Variation der Höhe einen definierten Impuls auf die Decke aufbringen zu können. Jedoch führen unterschiedliche Eigengewichte der Decken und die Art, wie der Sandsack auftrifft, zu Abweichungen. Beim Sandsackabwurf werden unter anderem Eigenfrequenzen im hochfrequenten Bereich stark angeregt, was die Auswertung erschwert (vgl. [14]). Zudem führt der Impuls bei leichten Decken dazu, dass die induzierte Beschleunigung die Erdbeschleunigung übersteigt, was zum Abheben der Messsensoren führt. Schwere Decken hingegen lassen sich durch diese Methode gut anregen.

### 1. 1. 7 Shaker

Ein Shaker ist ein sogenannter Schwingungserreger, welcher mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch angetrieben wird und es ermöglicht, das Bauwerk in einer definierten Frequenz anzuregen. Nach vorhergehender Bestimmung der Eigenfrequenz kann mit dem Shaker die Decke in Resonanz angeregt werden. Schaltet man nach Erreichen des stationären Zustands den Schwingungserreger ab, so ergibt sich eine Ausschwingkurve, welche für die Bestimmung der Dämpfung besonders geeignet ist (siehe Abschnitt 1. 4. 1). Beabsichtigt man die Dämpfung über die Resonanzkurve zu berechnen, so wird die Decke mit dem Shaker in definierten Bereichen um und in der Eigenfrequenz angeregt.



Abb. 4.3 Shaker (links) mit Steuereinheit (rechts) [7]

Laut Winter/Hamm/Richter [26] ist der Einsatz und Transport eines Schwingungserregers oder Shakers bei in-situ-Messungen mit einem nicht vertretbaren Aufwand verbunden. Für die in-situ-Messungen in der Wittenbauerstraße, welche im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden, wurde dieses Messverfahren nicht in Betracht gezogen. Hinzu kommt, dass die zeitlichen Rahmenbedingungen auf der Baustelle (laufender Baustellenbetrieb) und die daraus resultierenden Störeinflüsse den Messbetrieb zusätzlich erschwert hätten.

### 1. 1. 8 Freies Gehen

Beim „freien Gehen“ wird wahllos und ohne definierte Schrittfrequenz über die Decke spaziert, sodass diese an jeder Aufnehmerposition angeregt wird. Ziel dieser Anregung ist neben den Eigenfrequenzen vor allem die Schwingbeschleunigung. Diese könnte infolge Resonanzerscheinungen der ersten Eigenfrequenz der Platte mit dem zweiten oder dritten harmonischen Anteil der Schrittfrequenz verstärkt angeregt werden und so zu unbehaglichen Werten führen.

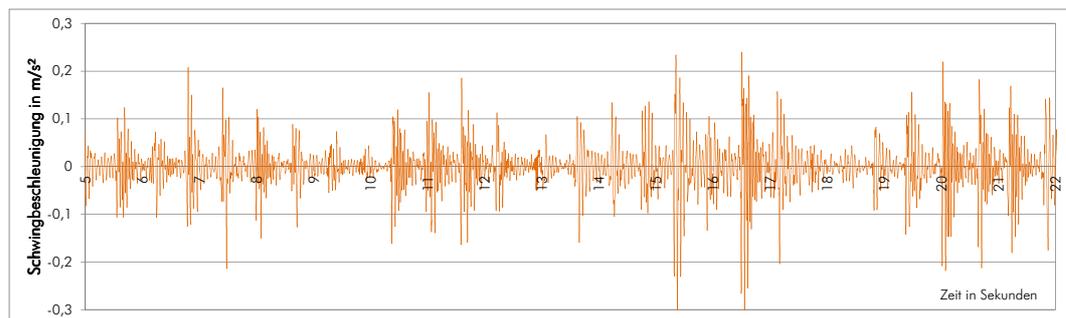


Abb. 4.4 zeitlicher Verlauf der Beschleunigung für regelloses Gehen

### 1. 1. 9 Geregelttes Gehen

Beim geregelten Gehen wird versucht, die Decke mit der zweiten oder dritten Harmonischen der Schrittfrequenz in Resonanz anzuregen. Ein Metronom gibt dabei den Takt vor, in welcher die Testperson zu gehen hat. Bei dieser Anregung können Frequenzen von bis zu 3 Hz generiert werden, was die anregbaren Eigenfrequenzen auf 9 Hz limitiert.

### 1. 1. 10 Anregung mit Bürste oder Trolley

Eine gleichmäßig, kontinuierliche Anregung mit jedoch unbekanntten Amplituden kann mit Hilfe einer Bürste oder eines Trolleys bewerkstelligt werden. Es ergibt sich eine breitbandige Anregung, was die Bestimmung von höheren Eigenfrequenzen ermöglicht. Die Anregung wird entweder von einer Person, welche sich auf der Decke selbst bewegt oder durch entsprechende Vorkehrungen ohne die Auflast der Person durchgeführt.

Weckendorf [23] und Weckendorf/Smith [25] verwendeten diese Anregung in Verbindung mit der Auswertesoftware ARTeMIS, mit deren Hilfe auch die Modalanalyse von ambienten Signalen mit Anregungen unbekannter Größe durchgeführt werden kann.

## 1.2 Modalanalyse

In der Literatur angegebene Werte zu Dämpfung und Schwingungsamplituden werden zum Teil als „globale“ Parameter angegeben. Der Begriff „global“ in diesem Gebrauch verdeutlicht, dass die Parameter direkt aus der erhaltenen Schwingungsantwort, ohne jegliche Differenzierung abgeleitet werden.

Die in der Versuchstechnik und der angeschlossenen Auswertung angewandte „Modalanalyse“ hingegen berücksichtigt den Umstand, dass sich die Schwingungsantwort aus mehreren Sätzen von Modalparametern wie Modenform (=Eigenform), Eigenfrequenz und Dämpfung zusammensetzt. Konkret wird dabei jede auftretende Eigenform als (Sub-) Struktur mit einem Freiheitsgrad (Single-Degree-of-Freedom-(SDOF-)System) erachtet, welche durch die zugehörige Eigenfrequenz und Dämpfung beschrieben wird. Anhand dieser Parameter ist es in weiterer Folge möglich, die Frequenzantworten einer Struktur als Folge einer Anregung zu berechnen, indem die modalen Antworten entsprechend ihrer Anteile an der Strukturbewegung aufsummiert werden. [28]

## 1.3 Bestimmung der Eigenfrequenzen/Eigenformen

Die Eigenfrequenzen lassen sich im Allgemeinen über das Frequenzspektrum der Schwingbeschleunigung bestimmen, indem man die den Spitzenwerten (Peaks) zugehörigen Frequenzen notiert. Liegen aufeinanderfolgende Eigenfrequenzen sehr nahe beieinander oder befindet sich der Messpunkt in der Nulllage der untersuchten Eigenfrequenz, so ist die Bestimmung ohne tieferegehende Signalanalysen oder weitere Referenzpunkte oft nicht eindeutig zu bewerkstelligen. Die Auflösung  $\Delta f$  des mit Hilfe der Fast-Fourier-Transformation bestimmten Frequenzspektrums ergibt sich aus Abtastrate und Aufzeichnungsdauer und lässt sich nach Gl. [4.1] bestimmen.

$$\Delta f = \frac{F}{N} = \frac{F}{T \cdot F} = \frac{1}{T} \quad [4.1]$$

mit

F...	Abtastrate [Hz]
N...	Anzahl der Werte
T...	Dauer der Aufzeichnung [s]

Mit Hilfe von Messungen können auch die Eigenformen einer Konstruktion dargestellt werden. Um die Eigenformen eines Balkens oder einer Platte versuchsstechnisch bestimmen zu können, benötigt man Messpunkte an den Stellen der Amplitudenmaxima der jeweiligen Eigenform. Meist werden die Schwingungssensoren in einem dafür festgelegten Raster auf der zu messenden Konstruktion verteilt. Rechnet man die Messdaten nun auf die Schwingungswege um und bildet unter Anwendung der FFT die Wegspektren, so lassen sich diese auf 1 normieren. Die Verschiebungen in den Punkten - zufolge der zugehörigen Eigenformen - können für die jeweiligen Messpunkte direkt aus dem normierten Wegspektrum abgelesen und unter Berücksichtigung der Phasenin-

formation aus der FFT auf die Geometrie der gemessenen Konstruktion aufgetragen werden [12]. Anhand der so gewonnen Verschiebungen lassen sich schlussendlich zwei- bzw. dreidimensionale Darstellungen der Eigenformen generieren (siehe Abb. 4.5).

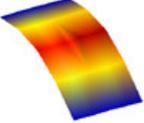
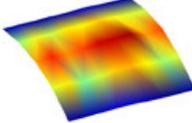
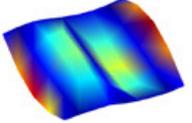
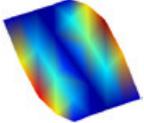
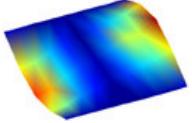
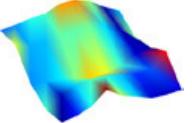
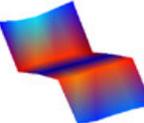
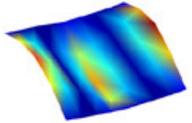
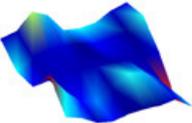
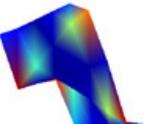
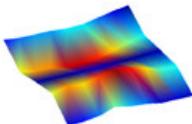
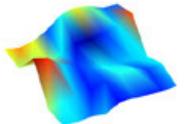
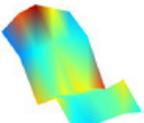
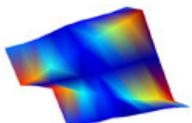
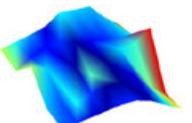
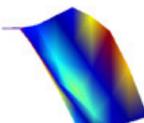
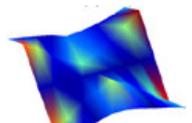
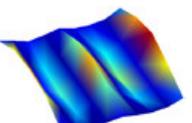
Single plate system (Test 2)			Two plate system (Test 9)					
Mode	$f$ [Hz]	Shape	Mode	$f$ [Hz]	Shape	Mode	$f$ [Hz]	Shape
1,1	12.0		1,1	11.5		1,4	62.2	
1,2	19.7		1,2	14.3		3,1	71.0	
2,1	41.7		1,3	19.2		2,4	78.2	
2,2	51.4		2,1	39.8		3,2	82.8	
3,1	77.7		2,2	44.7		3,3	88.2	
1,3	91.9		2,3	49.1		1,5	91.6	

Abb. 4.5 Beispiel von Eigenformen eines einzelnen BSP-Elementes (links) und einer Platte aus zwei verbundenen BSP-Elementen (rechts) mit zweiseitiger Lagerung [25]

Vereinfacht lässt sich die Eigenfrequenz auch durch das Abzählen der Nulldurchgänge eines Schwingvorganges errechnen, indem man die Anzahl der vollständigen Schwingungen durch die benötigte Zeitdauer dividiert. Diese Vorgehensweise ist aber nur bei Systemen mit nur einer Eigenfrequenz, bandbegrenzten Signalen oder für grobe Abschätzungen beim Ausschwingversuch sinnvoll, da sich bei einer Superposition von mehreren Schwingungseigenformen, je nach Intensität der jeweiligen Anteile, nur die kumulative Frequenz erfassen lässt.

## 1. 4 Bestimmung der Dämpfung von Baukonstruktionen

„Mit Dämpfung bezeichnet man jede Umwandlung von Bewegungsenergie in andere Energieformen (Energiedissipation).“ [12]

„Die Energiedissipation beruht auf unterschiedlichen Ursachen. Verantwortlich sind überwiegend Reibungsvorgänge im Baustoff, im Bauwerk und im Baugrund. Auch trägt die Bewegung des Systems im umgebenden Medium zu dessen Dämpfung bei. Bei den Reibungsvorgängen entsteht Wärme; diese verflüchtigt sich irreversibel. Die Wirkmechanismen werden in der Mehrzahl qualitativ begriffen, z.T. nur unscharf, deren quantitative Bezifferung ist hingegen schwierig. Diesbezüglich ist man auf Versuche an vergleichbaren Bauteilen oder Baukonstruktionen angewiesen.“[19]

Wie in den Ausführungen zu der menschlichen Empfindlichkeit gegenüber Schwingungen hervorgeht, ist die Dämpfung ein wesentlicher Faktor, der die Wahrnehmbarkeitsgrenzen stark beeinflusst. Jedoch ist die Dämpfung, wie schon im vorhergehenden Zitat angesprochen, einer jener Werte, welcher sich im Vorfeld der Bemessung und Dimensionierung von Bauteilen am schwierigsten fassen lässt, da die Dissipation neben der Materialdämpfung auch durch die vorhandene/n Geometrie- und Randbedingungen beeinflusst wird (vgl. [17]).

Bei im Bauwesen vorhandenen, schwingungsfähigen Konstruktionen wird, wie schon in Kapitel 2. 2. 2 Freie, gedämpfte Schwingung angenommen, von einer viskosen Dämpfung ausgegangen. In der Literatur finden sich immer wieder Dämpfungswerte für verschiedene Baustoffe bzw. Baukonstruktionen, welche entweder in Form des logarithmischen Dekrements  $\Lambda$  oder in Form des Lehr'schen Dämpfungsmaßes  $\zeta$  angegeben sind.

### 1. 4. 1 Bestimmung von Dämpfungswerten aus Versuchen

Um die Dämpfung von realen Bauteilen bzw. ganzer Bauwerke bestimmen zu können, existieren verschiedene mathematische Vorgehensweisen und Berechnungsmethoden, welche zum Teil auf aufwendigen numerischen Verfahren beruhen. Im Folgenden wird auf zwei Methoden näher eingegangen, welche in der Praxis am häufigsten Anwendung finden. Bei den dargestellten Methoden handelt es sich jeweils um eine indirekte Messung der Dämpfung. „Der direkte Weg (Ausmessen der Hystereseschleife, des Phasenwinkels, des Wärmestroms im Material) ist nur mit großem experimentellen Aufwand [...] an isolierten Prüfkörpern zur Ermittlung der Werkstoffdämpfung möglich;[...]“ [19]

Bei der indirekten Messung der Dämpfung werden entgegen der direkten Messung sämtliche Einflüsse miterfasst. Will man diese Werte auf andere Bauwerke übertragen, so ist man auf Schätzungen angewiesen, da das Verhältnis der einzelnen Beiträge von Baustoffdämpfung, Bauteildämpfung und Baugrunddämpfung unbekannt bleibt. [19]

## Ausschwingversuch

Um eine Ausschwingkurve ähnlich der Kurve in Abb. 4.6 zu erhalten, bieten sich zwei Formen der Anregung für das System an; entweder wird die Konstruktion gezielt aufgeschaukelt und dann freigegeben oder sie wird durch eine transiente bzw. impulsartige Anregung, wie z.B. eines heel-drops bzw. durch planmäßige statische Auslenkung mit anschließender Freisetzung in Schwingungen versetzt. Nach [19] ist die erste Vorgehensweise günstiger, da sich die gemessene Struktur schon während der Anregung in der Schwingungseigenform des darauf folgenden Ausschwingvorganges bewegt. Bei der zweiten Variante hingegen können zu Beginn Störungen auftreten, da die initiierte Auslenkung nicht mit der Schwingungseigenform der Ausschwingkurve übereinstimmt. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde der heel-drop (siehe Abschnitt 1.1.5) gewählt, da dieser nach [22] innerhalb einer Messreihe gut reproduzierbar ist. Ziel dieser Versuche ist die Bestimmung der Amplitudenunterschiede, welche nach Gl. [4.2] die Bestimmung des logarithmischen Dekrementes  $\Lambda$  ermöglichen.

$$\Lambda = \ln\left(\frac{u_i}{u_{i+1}}\right) = 2 \cdot \pi \cdot \zeta \quad (\text{vgl. Gl. [2.22] und Gl. [2.23]}) \quad [4.2]$$

Um die Auswirkungen von Ableseungenauigkeiten und Streuungen zu verringern, kann das logarithmische Dekrement auch über eine Reihe von  $n$  Schwingungen hinweg nach Gl. [4.3] berechnet werden.

$$\Lambda = n \cdot \ln\left(\frac{u_0}{u_n}\right) \quad [4.3]$$

Umgeformt ergibt sich das Lehr'sche Dämpfungsmaß  $\zeta$  somit zu

$$\zeta = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot \ln\left(\frac{u_0}{u_n}\right). \quad [4.4]$$

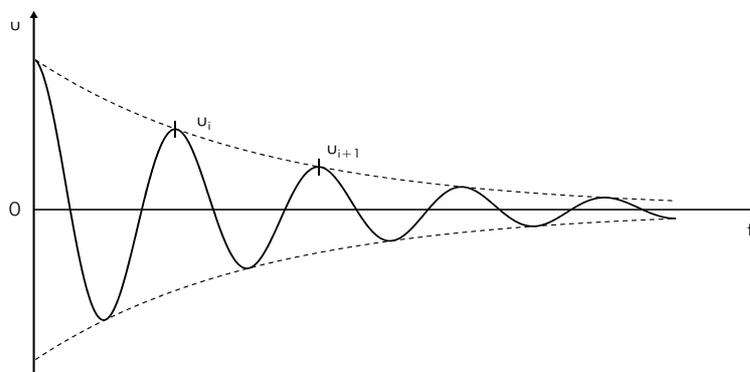


Abb. 4.6 freie Schwingung mit viskoser Dämpfung  $\zeta=10\%$

Für die Auswertung der Dämpfung wird ab der ersten Schwingung, welche die Charakteristik der Ausschwingkurve aufweist, zu zählen begonnen. Vor allem bei der Anregung

durch Auslenkung benötigt das System einige Schwingungen, in denen die Störungen aus höheren Schwingungsanteilen abklingen können [19]. Was die Anzahl der auszuwertenden Schwingungen betrifft, so gibt es keine genaue Festlegung. Um Ungenauigkeiten zu minimieren, sollte die maximale vorhandene Anzahl an Schwingungen berücksichtigt werden. Im Übergangsbereich am Ende der Ausschwingkurve, im annähernd horizontalen Verlauf der Umhüllenden, kann es jedoch vorkommen, dass gewisse Dämpfungsmechanismen nicht mehr zum Tragen kommen und sich das Dämpfungsverhältnis ändert (vgl. [19]).

### Resonanzversuch [19]

Für den Resonanzversuch wird die zu untersuchende Konstruktion in einem definierten Frequenzbereich um die Eigenfrequenz mit Hilfe eines Schwingungserregers in den stationären Schwingungszustand versetzt und die Bauwerksantwort gemessen. Anhand dieser Daten lässt sich für die gemessenen Frequenzen ein sogenanntes Resonanzspektrum erstellen. Mit Hilfe des Verstärkungsfaktors  $V$  (=Überhöhungsfaktor) an der Resonanzstelle (siehe Gl. [4.5]) oder der sogenannten Halbwertsbreite (siehe Gl. [4.6]) lässt sich in weiterer Folge die Dämpfung bestimmen. Abb. 4.7 zeigt den Verlauf einer vollständig ausgemessenen Resonanzkurve, in welche die notwendigen Parameter für die Berechnungen nach Gl. [4.5] und Gl. [4.6] eingetragen sind.

$$\zeta = \frac{1}{2} \cdot V^{-1} \quad (\text{Verstärkungsfaktor } V \text{ aus Gl. [2.41]}) \quad [4.5]$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta\Omega}{\omega} \quad [4.6]$$

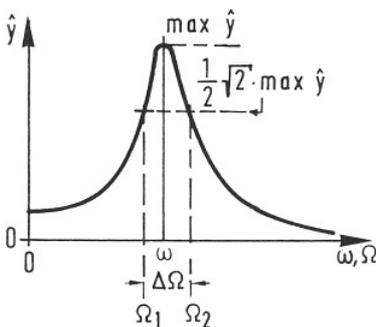


Abb. 4.7 Resonanzkurve [19]

Diese Art der Messung ist mit großem Aufwand verbunden. Da die Resonanzkurve sehr schmalbandig ist, benötigt man eine sehr feine Abstufung der einzelnen stationären Frequenzen, um eine genaue Messung von  $\Delta\Omega$  zu erzielen. Bei Konstruktionen mit sehr geringen Dämpfungen ist von diesem Versuchsaufbau abzuraten, da Schäden an der Baukonstruktion nicht auszuschließen sind.

### 1. 4. 2 Allgemeines zu den Dämpfungen

Wie schon in *Abschnitt 1. 2* erwähnt, ist bei der Dämpfung zu unterscheiden, ob es sich um eine effektive Dämpfung oder eine modale Dämpfung einer bestimmten Eigenfrequenz handelt. In der Literatur werden diesbezüglich oft keine Angaben gemacht, was die Verwendbarkeit stark einschränkt. Verwendet man jedoch für Berechnungen des dynamischen Verhaltens im Bezug auf die erste Eigenfrequenz die effektive Dämpfung, so führt das zu einer Überbewertung des Dämpfungsverhaltens, da die modale Dämpfung in Wirklichkeit geringer ist. Auch die Angabe, um welche Art von Dämpfung (Lehr'sche Dämpfung, logarithmisches Dekrement, viskos, linear,...) es sich bei Literaturangaben handelt, ist nicht immer einwandfrei nachvollziehbar.



## Messungen \_massive\_living

Eine wichtige Basis dieser Arbeit sind die Schwingungsmessungen an den Zwischendecken im Wohnbauprojekt „\_massive\_living“ in der Wittenbauerstraße, 8010 Graz, Österreich. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage für weitere Erkenntnisse über das materialspezifische dynamische Verhalten von Decken aus BSP-Elementen. Im Folgenden wird die konstruktive Anordnung der untersuchten Elemente und der Messvorgang dargelegt.

### 1 Objektbeschreibung

Das Objekt \_massive\_living ist ein gefördertes Sozialwohnbauprojekt, welches in der Wittenbauerstraße in Graz realisiert wurde. Mit Baubeginn im Sommer 2011 erfolgte die Fertigstellung im Herbst 2012. Es handelt sich bei diesem Projekt um zwei Gebäude mit drei oberirdischen Geschossen und einem unterirdischen Geschoss in Form einer gemeinsamen Tiefgarage, welche für insgesamt 22 Wohneinheiten Platz bieten. Die Erschließung der jeweiligen Gebäude erfolgt über einen zentralen Stiegenhauskern aus Stahlbeton. Die ringsum angeordneten Wohneinheiten sind hier, mit Ausnahme der Bodenplatte im Erdgeschoss, zur Gänze in Holz-Massivbauweise ausgeführt.

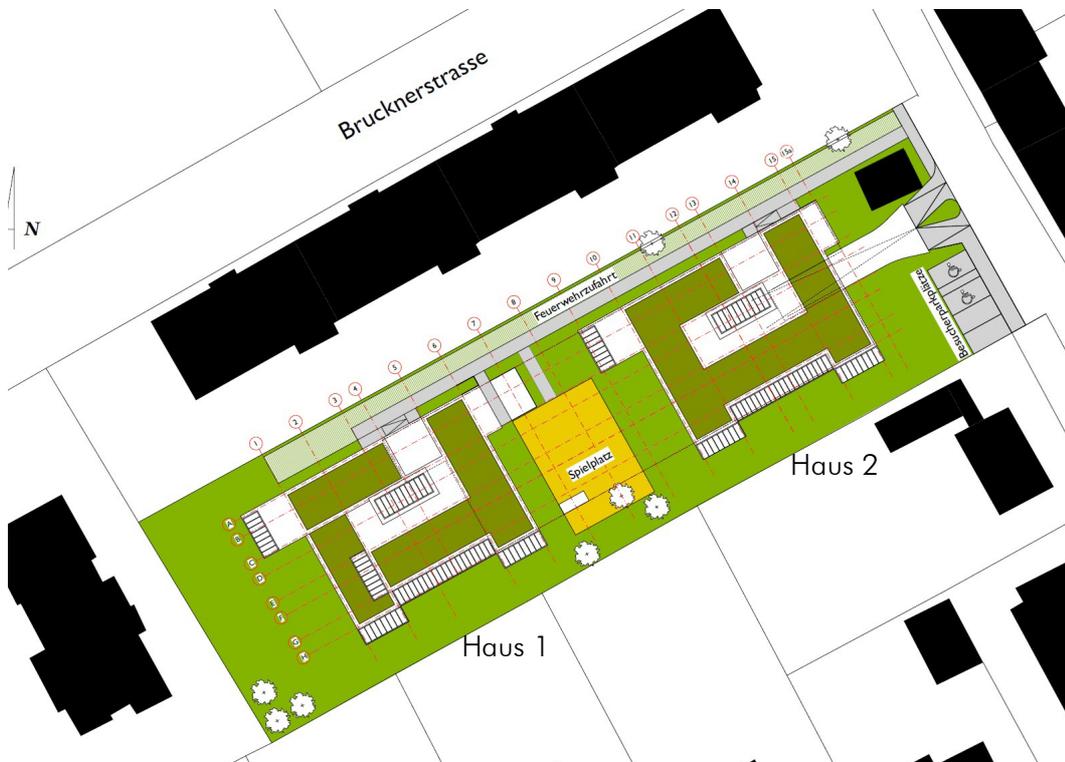


Abb. 5.1 Lageplan des Bauvorhabens \_massive\_living [20] (bearbeitet)

Wie für die Holz-Massivbauweise üblich, wurde die Tragstruktur fast ausschließlich aus flächig verarbeiteten Holzelementen erstellt. Für die Wandscheiben wurde ein 5-schichtiges Brettsperrholz aus Fichte mit insgesamt 95 mm eingesetzt (Schichtenfolge siehe Tab. 5.1). Wiederum 5-schichtig und aus Fichte sind auch die horizontalen Deckenplatten, jedoch mit einer Dicke von 184 mm für die Dachelemente und 198 mm für die Zwischengeschosselemente. Eine Besonderheit bei diesem Bauprojekt ist die sogenannte „Laubholzwohnung“, welche zu einem großen Teil Wandelemente aus Birkenbrettsperrholz besitzt und zudem durch Langzeitmessungen von Feuchtigkeiten und Temperatur durch das Institut für Holzbau und Holztechnologie der Technischen Universität Graz beobachtet wird.

Schicht	Wand [mm]	Dach [mm]	Decke [mm]
1	19	39	39
2	19	33	40
3	19	40	40
4	19	33	40
5	19	39	39
<b>Gesamtdicke</b>	<b>95</b>	<b>184</b>	<b>198</b>

Tab. 5.1 Schichtenfolge der BSP-Elemente

Die Obergeschosse der beiden Einzelgebäude unterscheiden sich in den Grundrissen kaum, wodurch sich der in Abb. 5.2 dargestellte Geschossplan mit geringen Variationen auf alle Obergeschosse beider Gebäude übertragen lässt. Die Variationen zwischen Haus 1 und Haus 2 sind im Schnitt A-A (siehe Abb. 5.3) zu erkennen. Zum einen fehlt im Haus 1 (westliches Gebäude) im zweiten Obergeschoss eine Wohneinheit, welche der in Abb. 5.2 mit der Nummer 2 ausgewiesenen Wohnung entspricht. Zum anderen ist beim Haus 2 (östliches Gebäude über der Einfahrt in die Tiefgarage) im Erdgeschoss die Wohneinheit der Nummer 4, entsprechend Abb. 5.2, nicht vorhanden, da sich in diesem Bereich die Tiefgarageneinfahrt und der Müllraum befinden. Aus schalltechnischen Gründen sind die einzelnen Wohneinheiten durch eine vertikale Fuge von 3 cm vollständig von einander entkoppelt und bilden so jeweils ein eigenes Tragsystem. Die Geschossdecken sind für die Übertragung von Horizontalkräften und zur Lagesicherung durch Stahllaschen mit dem Stiegenhauskern verbunden. Diese getrennte Ausführung hätte auch den Vorteil, dass sich die einzelnen Türme separat errichten lassen. Zudem können auch keine niederfrequenten Schwingungen über die Zwischendecke von einer Wohneinheit in die andere übertragen werden.

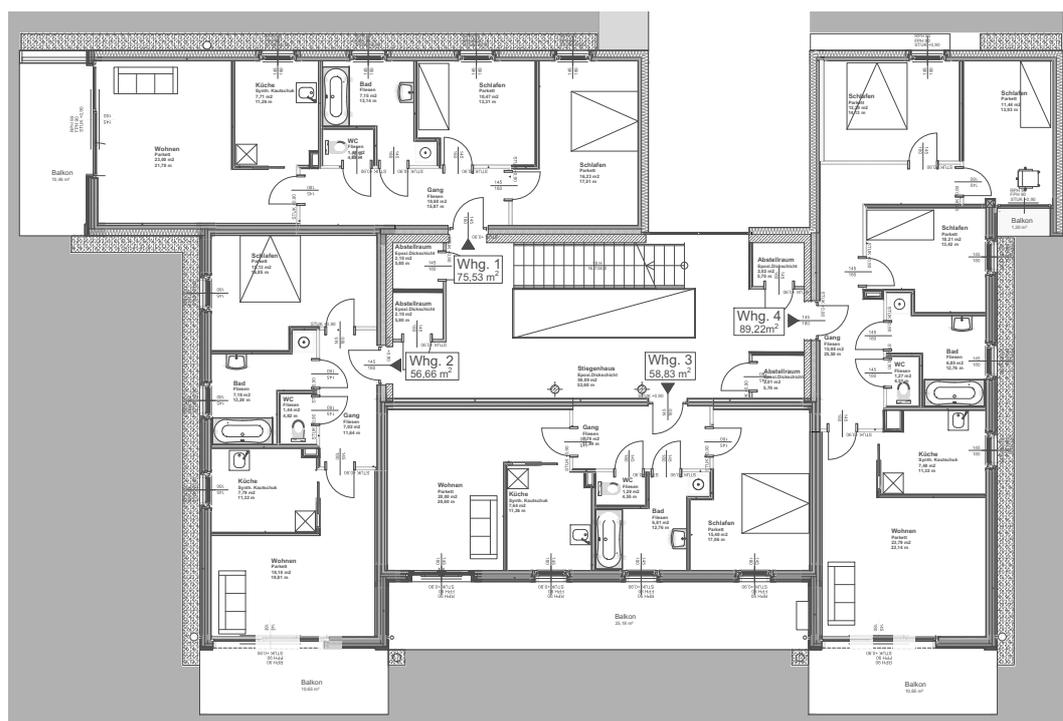


Abb. 5.2 Grundriss 1.OG Haus 1 [Arch. DI Peter Zinganel, Muchargasse 30, 8010 Graz] (bearbeitet)

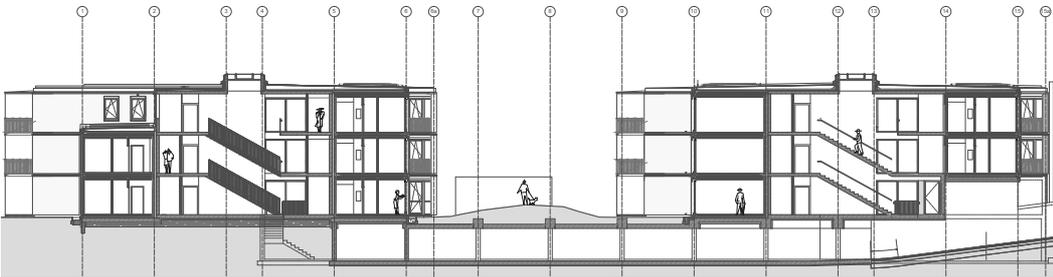


Abb. 5.3 Längsschnitt A-A [Arch. DI Peter Zinganel, Muchargasse 30, 8010 Graz] (bearbeitet)

## 2 Ausführungsdetails

In diesem Abschnitt wird auf die statisch und montagetechnisch bedingte, konstruktive Ausführung der Zwischendecken eingegangen.

### 2.1 Gliederung der Brettsperrholzelemente

Raumhohe Fenster- und Balkontüröffnungen, ohne Sturz- oder Parabetausbildung, ermöglichen eine effiziente Bauweise, da zum einen kein zusätzlicher Verschnitt bei den BSP-Elementen anfällt, und zum anderen die Wandformate sich zu durchgehenden Rechtecken ohne Längsstöße ergeben (Wandhöhe 2,80 m).

Die Geschossdecken und das Dach wurden in kleinere Einzelplatten unterteilt, welche dann auf der Baustelle mit Hilfe einer fremden Feder verbunden wurden. Da das Reggeschoss äußerst einfache Abmessungen besitzt, ergeben sich fast ausschließlich Plattenabmessungen von 3 m Breite und 5,17 m Länge. Die genaue Gliederung der Deckenelemente ist in Abb. 5.4 ersichtlich. Bei der rechten Wohneinheit wurden quer zur Hauptrichtung drei Elemente mit Längen von 4,42 m und 4,52 m eingesetzt, welche an einer Seite auf einem Unterzug aufliegen. Die angeführte Gliederung der Deckenplatten ist den Ausführungsplänen der ausführenden Holzbaufirma „Holz Bau Weiz“ entnommen und trifft auf jene Wohneinheiten zu, in welchen im Zuge dieser Arbeit Schwingungsmessungen durchgeführt wurden.

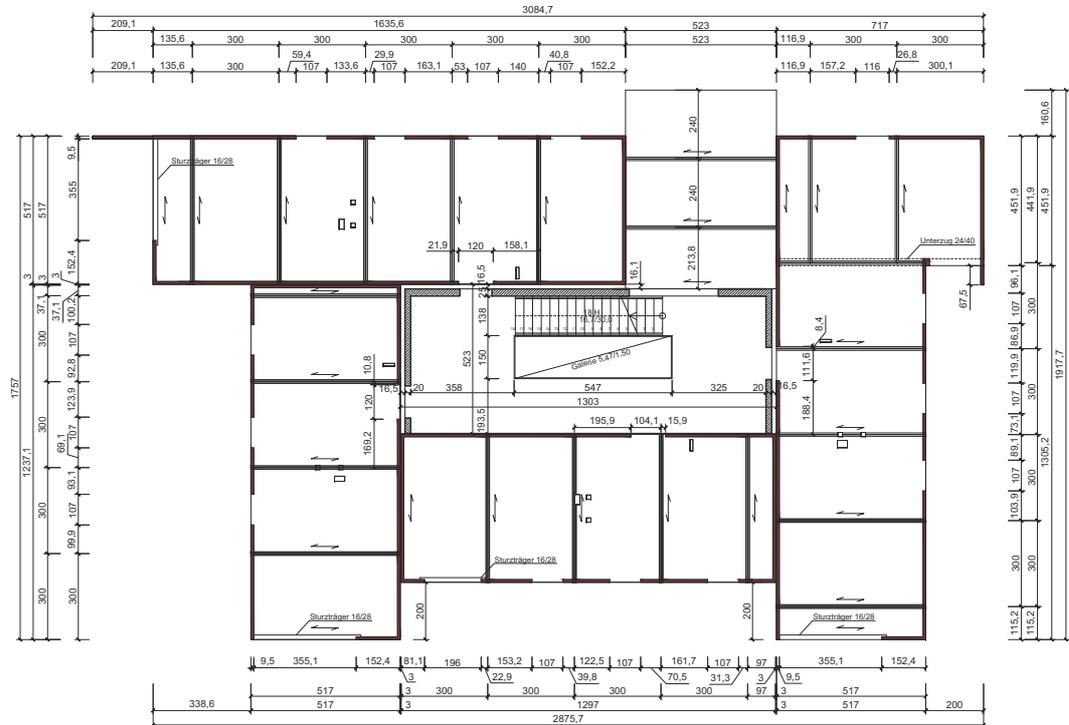


Abb. 5.4 Gliederung und Abmessungen der Zwischendecke im Regelgeschoß [Holz Bau Weiz, Birkfelder Straße 40, 8160 Weiz] (bearbeitet)

## 2.2 Auflager der Zwischendecken

Für die Lagerung der Zwischendecken wurde in der Lagerfuge ein Entkopplungsstreifen des Typs Trelleborg STG 50 (siehe Anhang B - Produktdatenblätter) angeordnet. Dieser soll die Flankenübertragung des Trittschalls von einer Wohneinheit in die darüber- oder darunterliegende Wohnung unterbinden. Neben der Funktion der Trittschalldämmung übernimmt dieser Streifen auch die Aufgabe der Fugenabdichtung. Bei den restlichen Stoßausbildungen, welche sich in der thermischen Außenhülle befinden, wurde für die Unterbindung von eventuellen Luftströmungen und den daraus resultierenden Feuchteintrag in die Wandkonstruktion ein kompressibles Dichtungsband eingesetzt.

Vor dem Aufstellen der Geschosswände wird die Deckenplatte mit Vollgewindeschrauben mit den darunter liegenden Wänden verschraubt, um die Einleitung von Schub- und Zugkräften zu gewährleisten. Die Anordnung der Schrauben erfolgt dabei mit einem Eindrehwinkel von  $45^\circ$  in der Wandebene. Die aufgehenden Wände wiederum wurden mit Winkelverbinder des Typs 105 mit Rippe und Zuganker 420 M20 der Firma Simpson Strong-Tie® am Fußpunkt mit den Deckenelementen befestigt.

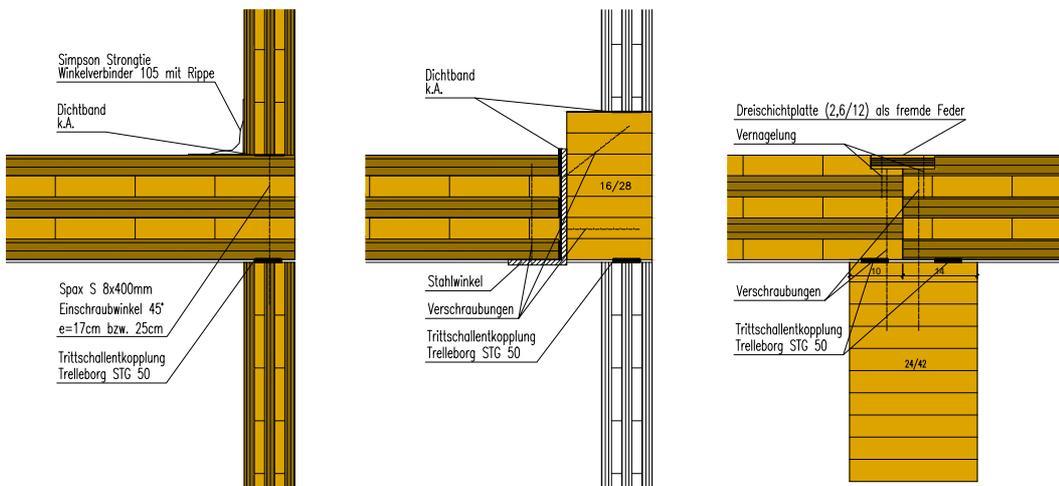


Abb. 5.5 Auflagerdetails der Zwischendecken

Neben der soeben beschriebenen Standardlagerung kommen bei dem Bauvorhaben auch Sonderlösungen im Bereich großer Öffnungen und Deckenspannweiten zum Einsatz. Das mittlere Detail in Abb. 5.5 zeigt die Ausbildung eines Sturzträgers, wie er bei größeren Fensteröffnungen eingesetzt wird. Die Anbindung der Deckenplatte erfolgt hier über einen Stahlwinkel und ist an der stirnseitigen Stoßstelle wiederum mit einem kompressiblen Dichtband versehen, um Konvektion und Schallnebenwege zu unterbinden. Die konstruktive Einbindung des Sturzträgers in die Außenwand erfolgt analog zur Standardausführung mit Entkopplungsstreifen unterhalb, mit Verschraubung mit Vollgewindeschrauben und Dichtband oberhalb.

Bei der südlichen Wohnung in Abb. 5.4 (Wohnung 3 in Abb. 5.2) ist die Decke im Bereich der größeren Fensteröffnung im 1.OG auf einen Sturzträger gelagert. In der darüber befindlichen Wohnung im 2.OG befindet sich in diesem Bereich keine Fensteröffnung. Konstruktiv wurde im 2.OG daher auf den Sturzträger verzichtet und die Decke im Bereich der Öffnung von unten mit dem Wandelement verschraubt.

In der östlich situierten Wohnung des Grundrisses in Abb. 5.4 (Wohnung 4 in Abb. 5.2) wird ein größeres Deckenfeld durch die Anordnung eines Unterzuges bewerkstelligt. Der Entkopplungsstreifen wird hier zwischen Unterzug und Deckenplatte eingelegt und die Zwischendecke in weiterer Folge mit dem Unterzug verschraubt.

## 2.3 Stoßausbildung der Deckenelemente

Die Stöße zwischen den einzelnen Elementen werden auf der Baustelle mit Hilfe einer fremden Feder verschlossen. Die Feder, in Form einer Dreischichtplatte mit dem Querschnitt 2,6 / 12 cm, wird dabei in den vorgefertigten Falz der Brettsperrholzplatten eingelegt und vernagelt. Diese Verbindung trägt neben der Dichtung der Fuge auch zum flächigen Verbund und infolge dessen zu Kraftübertragungen normal zur Hauptspannungsrichtung bei.

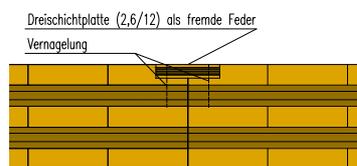


Abb. 5.6 Verbindung der Stöße

## 2.4 Fußbodenaufbau

Der Fußbodenaufbau samt der Lastaufstellung, welcher auf den gemessenen Zwischendecken aufgebracht wurde, ist der Tab. 5.2 zu entnehmen. Der Fußbodenbelag wird dabei insofern nicht berücksichtigt, da er zum Zeitpunkt der Messungen in Bauphase 4 noch nicht eingebaut war.

Lfd. Nr.	Dicke [mm]	Schicht	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$d \cdot \gamma$ [kN/m <sup>2</sup> ]
-	(10,0)	(Fliesen + Dünnbettmörtel oder Klebeparkett)	(8,0)	(0,30) (0,08)
1	60,0	Estrich	22,0	1,32
2	-	PAE-Folie	-	0,05
3	30,0	Heralan TPT 30	1,4	0,04
4	60,0	Schüttung Split gebunden	12,0	0,72
5	-	PAE-Folie	-	0,05
6	198,0	Brettsperrholz BSP	4,8	0,95
7	80,0	abgeh. Decke GK	-	0,33
		(doppelte Beplankung - REI60)		
	<b>428,0</b>	<b>Summe ohne Belag</b>		<b>3,46</b>
		ohne Brettsperrholz		2,51

Tab. 5.2 Aufbau der Zwischengeschossdecke [20] (bearbeitet)

## 3 Beschreibung der Messpunkte

Nach Bestandsaufnahme der konstruktiven Details wurde eine Auswahl der Deckenelemente getroffen, die gemessen werden sollen. Primäres Auswahlkriterium war dabei die vorhandene Lagerbedingung der einzelnen Deckenelemente. Dabei wurde versucht, die Abweichungen der Randbedingungen innerhalb einer Gruppe mit der gleichen Lagerbedingung zu vermeiden, was jedoch aufgrund der vielen Öffnungen in den Außenwänden nicht immer möglich war. Weiters wurde die Anordnung der Messpunkte auf den einzelnen Elementen in Abhängigkeit der möglichen Eigenformen des Systems festgelegt. Aus diesen Überlegungen ergab sich die in Abb. 5.7 dargestellte Auswahl der Messpunkte. Eine detaillierte Beschreibung der Auswahlkriterien und der verwendeten Punktbezeichnung ist den folgenden Unterkapiteln zu entnehmen.



Abb. 5.7 gewählte Deckenelemente und Anordnung der gemessenen Punkte

### 3. 1 Verwendete Punktbezeichnung

Der in Abb. 5.7 ersichtliche Grundriss enthält die im Zuge der Messungen verwendete Punktbezeichnung. An dieser Stelle wird auf die verwendeten Kürzel und deren Bedeutung näher eingegangen, da die Bezeichnungen und die damit verbundenen Festlegungen in den folgenden Kapiteln der Arbeit für Beschreibungen von Sachverhalten Verwendung finden.

Ergänzend ist zu beachten, dass die Nummerierung der Häuser (Haus 1 und Haus 2) gemäß den Festlegungen innerhalb dieser Arbeit von der Nummerierung im Polierplan des Architekten (Architekturbüro Zinganel) abweicht.

Eine Besonderheit bei diesem Projekt war die Möglichkeit, in verschiedenen Bauphasen Messungen durchzuführen. Dies ermöglichte die Beobachtung von Veränderungen der dynamischen Eigenschaften der Zwischendecke in den verschiedenen Ausbauphasen. Der Zeitpunkt der jeweiligen Messung wurde im zweiten Kürzel mit „BP“ und der zugehörigen Nummer dokumentiert.

Bei der Einteilung der Wohnungsnummer wurde ausgehend vom Stiegenhaus gegen den Uhrzeigersinn durchnummeriert, wobei mit der Wohnung neben dem Haupteingang geschossweise immer mit 1 begonnen wird. Es wird darauf hingewiesen, dass auch die in dieser Arbeit erstellte und verwendete Nummerierung der Wohneinheiten von der Nummerierung im Polierplan des Architekten abweicht.

Auch bei der Plattennummer wird je Wohnungseinheit mit 1 begonnen und gegen den Uhrzeigersinn fortlaufend nummeriert. Die drei gewählten Messpunkte M1, M2 und M3 beginnen pro Platte immer an der dem Stiegenhaus zugewandten Seite. Aus diesen Bedingungen ergibt sich für die Geschosse die in Abb. 5.7 dargestellte Plattennummerierung.

Eine wichtige Einflussgröße, welche in der Bezeichnung als Kürzel ebenfalls ersichtlich wird, ist die Art der Schwingungsanregung; diesem Kürzel direkt angehängt ist die Nummer der Person, welche diese Anregung induziert hat. Eine genaue Beschreibung der Anregungsarten und der Versuchspersonen ist in *Abschnitt 4. 4* angeführt.

Um die Anzahl der Messungen pro Punkt und Anregungsart zu dokumentieren, wurde am Ende der Bezeichnung eine laufende Nummer eingefügt.

Kurzbezeichnung	Bedeutung
BR1, BR2	... Adresse
	BR1 ... westliches Haus (Haus 1) BR2 ... östliches Haus über der Einfahrt (Haus 2)
BP1, BP2, BP3, ...	... Bauphase
	BP2 ... verschraubte Deckenplatte BP3 ... fertiger Rohbau BP4 ... Ausbau mit Estrich
G0, G1, G2	... Geschöß
	G0 ... Erdgeschoss G1, G2 ... 1. Obergeschoss, 2. Obergeschoss
W1, W2, W3, W4	... Wohnung (geg. Uhrzeigersinn)
P1, P2, P3, P4	... lfd. Plattennummer (geg. Uhrzeigersinn)
FG1, FG2, ..., HD1, HD2, ...	... Anregungsart und Nummer der Versuchsperson
	FG ... freies Gehen HD ... heel-drop
O1, O2, O3, ...	... lfd. Nummer der Messung
M1, M2, M3	... Position auf Platte
	M1 ... 1. Viertelpunkt M2 ... Feldmitte M3 ... 3. Viertelpunkt
<b>Beispiel einer Messbezeichnung</b>	
BR1_BP2_G1_W2_P1_HD2_O2_M2	
Haus 1_Bauphase 2_1 Obergeschoss_Wohnung 2_Platte 1 _heel-drop, Versuchsperson 2_Messung 02_Punkt in Feldmitte	

Tab. 5.3 Legende der verwendeten Punkbezeichnung

### 3. 2 Lagerbedingungen der gewählten Elemente

Wie zu Beginn dieses Abschnitts erwähnt, wurden die Deckenelemente primär nach der vorhandenen Lagerbedingung ausgewählt. Die getroffene Auswahl der gemessenen Deckenelemente kann auf folgende vier Lagerbedingungen reduziert werden:

- A. Platte mit dreiseitigem Auflager auf Wänden
- B. Platte mit zweiseitigem Auflager auf Wänden
- C. Platte mit dreiseitigem Auflager auf zwei Wänden und einem längsseitigen Unterzug
- D. Platte mit zweiseitigem Auflager auf Wand und Unterzug

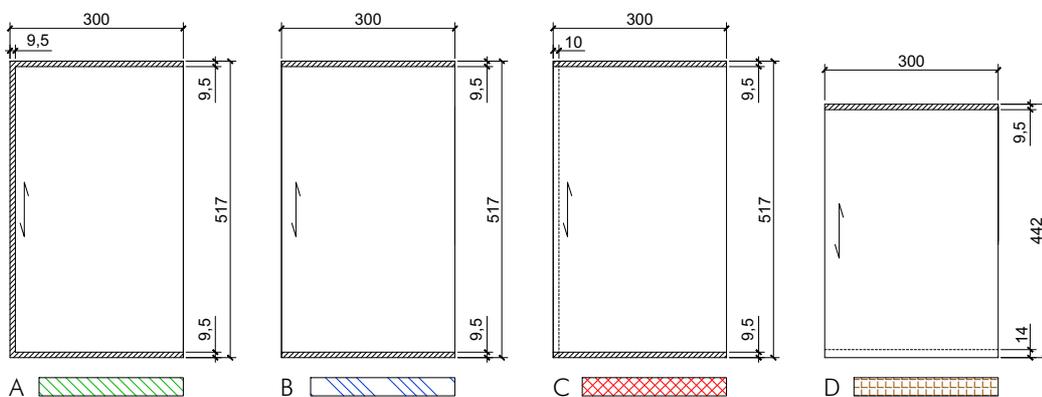


Abb. 5.8 Lagerbedingungen der gemessenen Deckenelemente

In einer ersten Betrachtung wird der Umstand vernachlässigt, dass die Wände zum Teil durch Fensteröffnungen unterbrochen sind und dadurch nicht immer eine durchgehende Lagerung der Platten auf den Wänden vorhanden ist (siehe Abb. 5.4).

### 3. 3 Anordnung der Messpunkte am Element

Die Positionierung der Messpunkte am Element richtet sich nach den Stellen, an welchen die größten Auslenkungen zu erwarten sind. Mit dem verwendeten Messequipment war es möglich, an drei Stellen die Schwingbeschleunigung zufolge einer Anregung simultan aufzuzeichnen.

Die Aufstellung der Sensoren richtet sich nach den Eigenformen, welche man durch die Messung erfassen und identifizieren will (vgl. [16], [23], [25]). Dafür werden die Sensoren in den Punkten der maximalen Auslenkung zufolge einer jeweiligen Eigenform aufgestellt. Dies bedeutet bei Eigenformen, welche sich aus Schwingungen in Längs- und Querrichtung der Platte zusammensetzen, je nach untersuchter Anzahl halber Sinuswellen eine dichte, rasterartige Verteilung der Messpunkte über die gesamte zu messende Platte. Durch die begrenzte Anzahl an Sensoren sind in weiterer Folge pro zu

untersuchender Plattenkonfiguration mehrere Messzyklen mit jeweils unterschiedlicher Aufstellung der Sensoren notwendig.

Da es sich bei den durchgeführten Messungen um in-situ Messungen während des laufenden Baustellebetriebes handelte, war eine derart aufwendige Messkonfiguration für die große Anzahl zu messender Deckenelemente nicht zu bewältigen. Für die Messungen wurden die Sensoren daher nur entlang der Mittellinie des Deckenelementes in den Viertelpunkten aufgestellt, was die Unterscheidung der ersten drei Eigenformen in Plattenlängsrichtung ermöglicht (siehe Abb. 5.9).

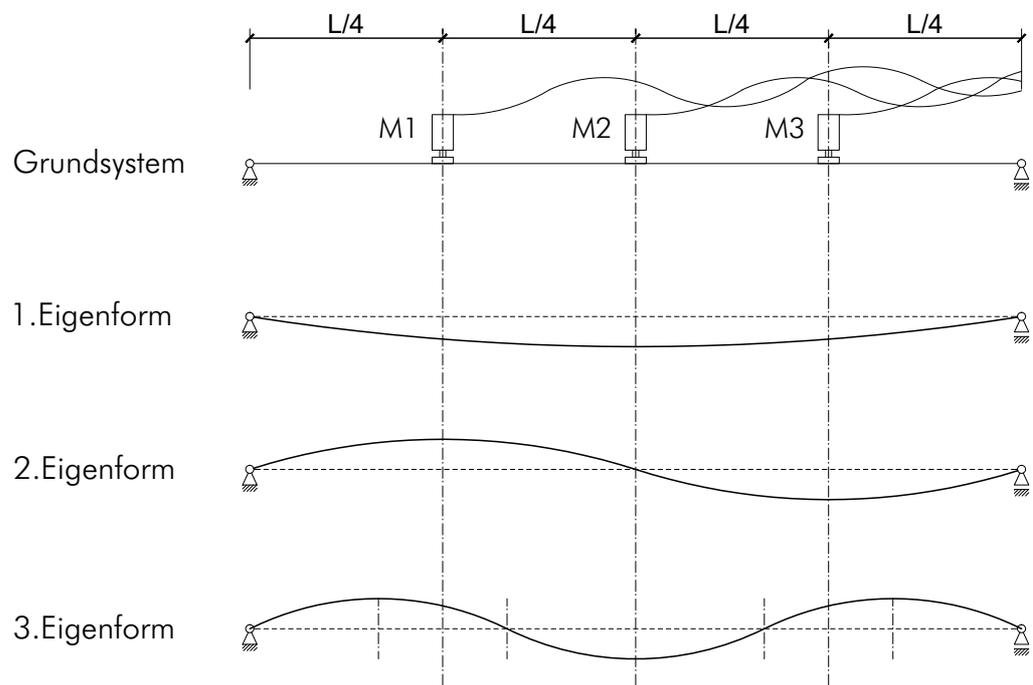


Abb. 5.9 Messpunkte und Eigenformen des Systems in Haupttragrichtung

Da die Frequenzen von Eigenformen höherer Art in Plattenquerrichtung - trotz dieser reduzierten Sensorpositionierung - anhand der Frequenzspektren dennoch bestimmt werden können, wurden diesbezüglich weitere Messungen für die exakte Zurordnung von Eigenformen aus den oben genannte Gründen vernachlässigt.

## 4 Abwicklung der Messungen

In diesem Abschnitt wird auf Vorgänge und Bedingungen eingegangen, die den Ablauf und das Umfeld der Messungen betreffen und Relevanz im Bezug auf das Messergebnis besitzen können.

### 4.1 Bedingungen bei der 1. Messung

Bei den Messungen am Mittwoch dem 23.11.2011 konnten zwei verschiedene Bauphasen (BP2 und BP3) dokumentiert werden. Während der Rohbau von Haus 1 schon soweit fortgeschritten war, dass nur noch die Dacheindeckung fehlte, wurde bei Haus 2 an diesem Tag begonnen, die Wände des ersten Obergeschoßes zu errichten. Aufgrund des vorhandenen Baufortschrittes und der laufenden Bauarbeiten war bei Haus 2 nur die Messung der Decke zwischen Erdgeschoss und erstem Obergeschoss von Wohnung 1 möglich. Die Decke war zum Zeitpunkt der Messung vollständig mit den darunterliegenden Wänden verschraubt, jedoch befand sich weder ein Aufbau in Form von aufgehenden Wänden noch eine Last in Form von gelagertem Baumaterial auf der Zwischengeschossdecke. Die Messungen der Platten P1 und P5 von Wohnung 1 in Haus 2 können somit der in *Abschnitt 3.1* festgelegten Bauphase 2 (BP2) zugeordnet werden. Die Messungen, die im Haus 1 getätigt wurden, können gemäß der getroffenen Festlegung der Bauphase 3 (BP3) zugeordnet werden, was dem fertigen Rohbau entspricht. Es konnten dabei alle in Abb. 5.7 dargestellten Punkte in den zwei Obergeschossen gemessen werden, mit Ausnahme von Platte 5 in Wohnung 1, welche nur in Haus 2 berücksichtigt wurde.

Die Messungen fanden an einem Werktag während des regulären Baubetriebes statt, weshalb häufig störende Einflüsse in Form von Hammerschlägen, Vibrationen eines Kompressors, Klammerschussgeräten und abruptes Absetzen schwerer Bauteile in den Messdaten vorhanden sind. Dies betrifft vor allem die Messungen in Haus 1, da bei diesem gerade der Aufbau für die Dacheindeckung und das Ausschalen der Stahlbetontreppe in das zweite Obergeschoss ausgeführt wurden. Grundsätzlich wurde versucht, diese Störeinflüsse so gering wie möglich zu halten, konnten aber nicht völlig ausgeschlossen werden. Bei besonders starken Störungen beziehungsweise, wenn die unbeabsichtigte, fremdinduzierte Schwingung zeitgleich dem heel-drop stattfand, wurde eine zusätzliche Messung aufgezeichnet. Bei Haus 2 traten derlei Störungen verhältnismäßig weniger oft auf.

Am Tag der Messungen gab es keine Niederschläge und es konnten keine sonstigen erhöhten Feuchtigkeitseinwirkungen auf die gemessenen Deckenelemente festgestellt werden.

## 4.2 Bedingungen bei der 2. Messung

Die Messungen fanden am Donnerstag den 14.06.2012 am späten Nachmittag statt. Bei beiden Häusern konnte der gleiche Ausbauzustand bezüglich der für die Messung relevanten Details festgestellt werden. Neben den Dacharbeiten war auch die Fassadengestaltung bis auf wenige Leibungsdetails abgeschlossen. Bei den untersuchten Wohnungen in Haus 1 waren die Zwischenwände, Wandverkleidungen und der Estrich bereits eingebracht (alter des Estrichs: 4 Wochen). Auch die abgehängte Decke war auf der jeweiligen Unterseite der gemessenen Zwischendecke schon fertiggestellt. Bei Haus 2 konnte mit Ausnahme der nicht aufgetragenen Gipskartonplatten der Deckenunterseite derselbe Ausbauzustand wie in Haus 1 vorgefunden werden, weshalb alle Messungen der festgelegten Bauphase 4 zuzuordnen sind.

Während in Haus 1 keine gelagerten Baumaterialien oder sonstige Auflasten auf den Bodenflächen vorzufinden waren, befanden sich in Wohnung 1 von Haus 2 die noch nicht aufgetragenen Gipskartonplatten der Deckenverkleidung. Diese wurden, jeweils angelehnt an die Wohnungstrennwand, im Auflagerbereich über den Platten P1 und P4 gelagert.

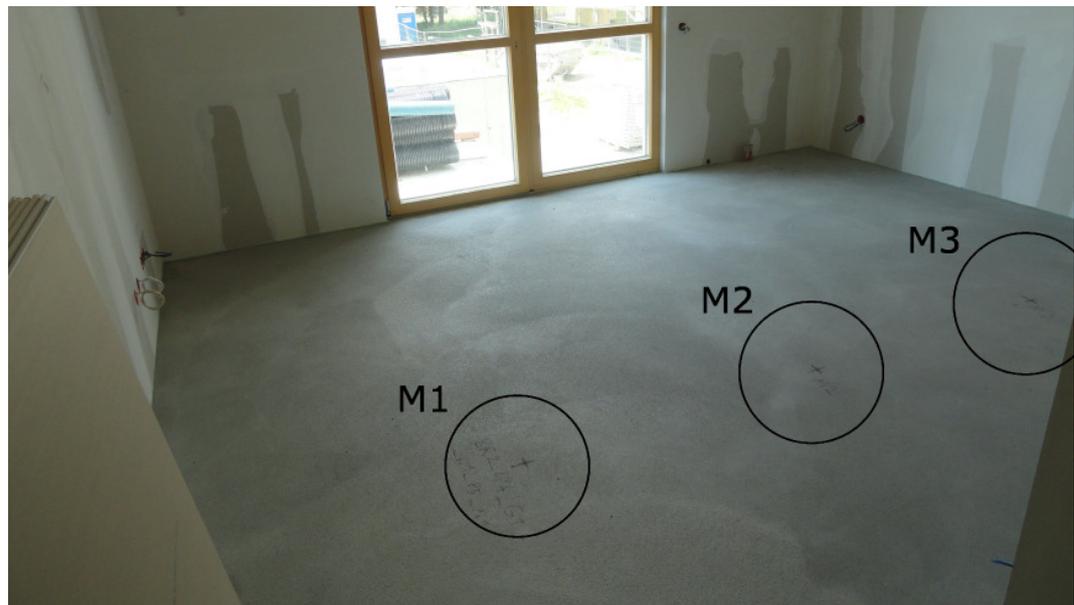


Abb. 5.10 Messpunkte von Haus 2, Wohnung 1, Platte P5 (BR2\_BP4\_G1\_W1\_P5) mit Gipskartonplatten lagernd auf Platte P4

Im Zeitraum der Messungen wurden außer den Installationsarbeiten in der Tiefgarage keine weiteren baulichen Tätigkeiten in den Gebäuden durchgeführt, wodurch keine offensichtlichen Störeinflüsse festgestellt werden konnten.

### 4. 3 Schwingungsanregung

Die dynamischen Kräfte, welche auf Wohnungsdecken einwirken, sind überwiegend durch Menschen verursacht. Um eine Anregung für die Messung zu generieren, stehen verschiedene Hilfsmittel und Möglichkeiten zur Verfügung, auf welche in *Kapitel 4. 1. 1 Anregungsarten* eingegangen wird. Für die Durchführung der Messungen bei \_massive\_living wurden die Anregungsarten heel-drop und „freies Gehen“ gewählt, da sie auf der Baustelle (laufender Baustellenbetrieb) am einfachsten zu reproduzieren waren, und Aussagen über Eigenfrequenzen, Dämpfungsmaße und Schwinggrößen erlauben. Während der Messungen befand sich eine Person auf der Decke, welche die Anregung durchführte. Vor Beginn der Messung stellte sich die Versuchsperson in der Mitte neben dem Sensor (M2) auf. Anschließend wurde im Messprogramm „Beam“ eine Kalibrierung und ein Nullabgleich durchgeführt, ehe die Aufzeichnung gestartet wurde (siehe *Abschnitt 5. 3*). Liefen die Aufzeichnungen, so erfolgte die Freigabe für die Versuchsperson, die geplante Anregung durchzuführen.

#### 4. 3. 1 Dauer der Messungen

Bei der Anregung durch den heel-drop wurde pro Einzelmessung in der Bauphase 2 und 3 (BP2 und BP3) ein heel-drop durchgeführt, bei entsprechender Vor- und Nachlaufzeit bewegte sich der Aufzeichnungszeitraum dabei zwischen rund 10 und 15 Sekunden. Die Anzahl der heel-drops pro Aufzeichnung wurde für die Messungen am 14.06.2012 (BP4) auf drei erhöht, was Aufzeichnungszeiträume von rund 15 bis 18 Sekunden ergab.

Die Schwingungsantwort der Decke beim freien Gehen wurde am 23.11.2011 über einen Zeitraum von mindestens 30 Sekunden aufgezeichnet. Um ein verwertbares Signal von 30 Sekunden zu bekommen, wurde für die Messungen am 14.06.2012 der Aufzeichnungszeitraum auf mindesten 35 Sekunden erhöht, um die fehlende Anregung in der Vorlaufzeit zu kompensieren.

### 4. 4 Versuchspersonen

Für die Anregung der Schwingungen kamen insgesamt drei Versuchspersonen zum Einsatz. Für die eindeutige Zuweisung der Versuchsperson zu einer getätigten Messung wurde den Probanden eine Nummer zugewiesen, welche in die Bezeichnung der abgelegten Messdaten miteinfließt (siehe *Abschnitt 3. 1*). In der folgenden Tabelle ist die Masse der jeweiligen Versuchspersonen angegeben, welche als wichtige Grundlage für die Berechnung der Lasteinwirkung dient, die im Zuge der Anregung aufgebracht wurde. Das verwendete Schuhwerk hat durch die Geometrie und Materialeigenschaften der Sohle Einfluss auf Stärke und Dauer der einwirkenden Anregung.

Nummer	Masse	Schuhwerk
1	80 kg	flache, steife Sohle
2	73 kg	flache, steife Sohle
3	90 kg	abgerunde Zehenbereiche

Tab. 5.4 Daten der Versuchspersonen

## 4.5 Einheit der aufgezeichneten Daten

Anhand der Schwingbeschleunigung werden neben Maximal- und Effektivwerten (*siehe Kapitel 6.1 Ausgewertete Parameter der Schwingungsmessungen*) auch die Lehr'sche Dämpfung über die Ausschwingkurve und die Eigenfrequenzen über das zugehörige Frequenzspektrum bestimmt, wohingegen von der Schwinggeschwindigkeit nur Maximal- und Effektivwerte ausgewertet werden. Als Einheit für die aufgezeichneten Messdaten wurde deshalb die Schwingbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ] gewählt.

# 5 Verwendetes Messequipment

Die Beschreibung des verwendeten Messequipments geht auf die gerätespezifischen Eigenschaften und Einstellungen ein und enthält Informationen bezüglich des messbaren Frequenzbereichs und der Abtastfrequenz („Samplingrate“) der aufgezeichneten Schwinggröße.

## 5.1 Schwingungssensoren

Für die Messungen wurden drei Schwingungsmessgeräte des Typs SMU 31 von HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) verwendet. Diese Geräte sind für die Messung mechanischer Schwingungen, denen Gebäude und Menschen in Gebäuden ausgesetzt sind, uneingeschränkt einsetzbar. Aufzeichnenbare Einheiten sind der Schwingweg [mm], die Schwinggeschwindigkeit [mm/s] und die Schwingbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ] in einem Frequenzbereich von 1 Hz bis 1 kHz. Als Basis wurde bei den Messungen die Schwingbeschleunigung aufgezeichnet. Alle weiteren Messgrößen wie Schwinggeschwindigkeit und Frequenzspektrum werden in der Nachbearbeitung von der Beschleunigung abgeleitet. Der messbare Frequenzbereich der Geräte von min 1Hz bis maximal 1kHz beinhaltet den geforderten Frequenzbereich der ÖNORM ISO 2631-2:2007, welche für die Beurteilung von Schwingungen in Gebäuden einen Bereich von 1Hz bis 80Hz festlegt.

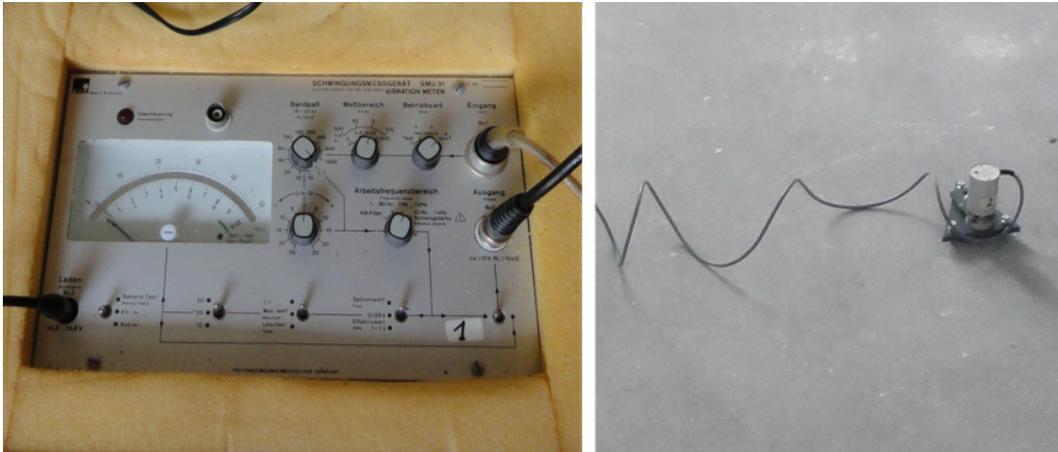


Abb. 5.11 Wandler und Beschleunigungsaufnehmer des SMU 31 von HBM

## 5. 2 Messverstärker

Für die Verstärkung und Digitalisierung des Messsignals wurde der HBM DMC Plus (große Ausführung) verwendet. Dieser besitzt 14 DV55 Einschübe und arbeitet mit einer Trägerfrequenz von bis zu 4,8 kHz. Für die Messung wurde eine Abtastfrequenz von 1,2 kHz verwendet, was dem 15-fachen der laut ÖNORM ISO 2631-2:2007 für Schwingungen in Gebäuden relevanten Maximalfrequenz von 80 Hz entspricht; Aliasingeffekte (siehe *Anhang A - Bezeichnungen, Formelzeichen und Begriffe*) können somit ausgeschlossen werden.

## 5. 3 Messprogramm

Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgte über einen Laptop mit PCMCIA-Schnittstelle. Die serielle Schnittstelle RS-232 des Messverstärkers konnte für diese Messungen nicht verwendet werden, da sie bei drei gleichzeitig verwendeten Messkanälen (M1, M2, M3) und einer Abtastfrequenz von 1,2 kHz eine zu geringe Datenrate aufweist.

Das verwendete Messprogramm „Beam 3.12d“ beinhaltet neben der Aufzeichnungsfunktion auch mathematische Bearbeitungsmodule, welche für die Berechnung weiterer Daten wie Frequenzspektrum und Schwinggeschwindigkeit herangezogen werden. Um den Arbeitsaufwand für die Aufbereitung der Messdaten zu minimieren, wurde für die Messung ein vorbereitetes Beam-Struktur-File verwendet. Dieses Struktur-File beinhaltete bereits weitere Berechnungsvorgänge für Daten, welche aus der gemessenen Schwingbeschleunigung gewonnen wurden, sodass beim Sichern der Messung neben der Schwingbeschleunigung auch das Spektrum und die Schwinggeschwindigkeit ausgegeben werden konnten. Genauere Angaben über die Berechnungsvorgänge und Auswertung der Messdaten finden sich in *Kapitel 6. 2 Vorgehensweise bei der Auswertung*.

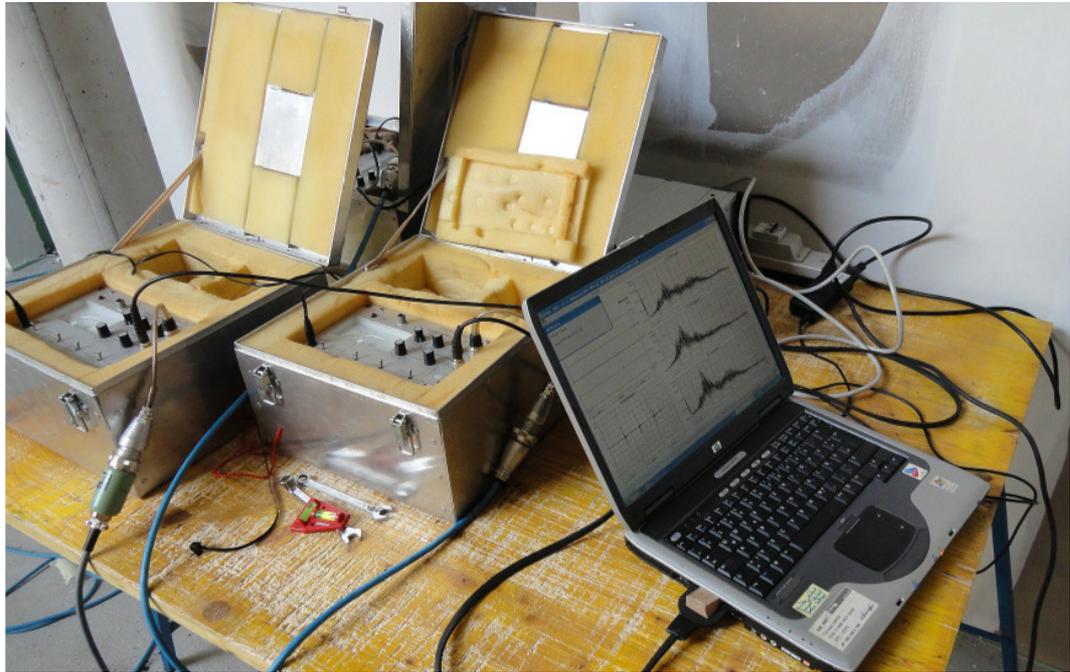


Abb. 5.12 aufgestellte Messeinrichtung auf der Baustelle

Für eine erste qualitative Kontrolle des gemessenen Signals auf der Baustelle diente die grafische Ausgabe von Beam, welche nach Beendigung des Messvorgangs das Zeitsignal der Schwingbeschleunigung und das Frequenzspektrum der Messkanäle anzeigt (siehe Abb. 5.12). Anhand dieser grafischen Ausgabe konnte überprüft werden, ob und wie stark sich störende Einflüsse aus dem Baustellenbetrieb auf die Ergebnisse auswirkten. Diese erste Information auf der Baustelle zeigte gegebenenfalls die Notwendigkeit von zusätzlichen Messungen für ein „sauberes“ Signal auf.

## 6 Subjektive Bewertung

Für die subjektive Beurteilung der untersuchten Deckenplatten wurden die Bewertungskriterien von Kreuzinger/Mohr [14] übernommen (siehe Tab. 3.2 in Kapitel 3. 1. 8 Kreuzinger und Mohr [14]). Da auch Winter/Hamm/Richter [26] diese Kriterien für die subjektive Bewertung von zahlreichen Holzdecken, welche die genannten Autoren in ihrer Forschungsarbeit untersucht haben, verwendeten, sind arbeitsübergreifende Vergleiche zu deren Daten ebenso möglich. Die Ergebnisse der gegenständlichen Bewertung, welche vom Verfasser durchgeführt wurde, ist in Anhang C - Ergebnisse der subjektiven Bewertung hinterlegt.



# Auswertung der Messungen

Um das dynamische Verhalten der gemessenen Deckenfelder beschreiben zu können, bedarf es der Parameter Schwingwege, Eigenfrequenzen und Dämpfungen. Im Folgenden wird erläutert, mit welchen Mitteln und unter welchen Randbedingungen die geforderten Ergebnisse berechnet wurden.

## 1 Ausgewertete Parameter der Schwingungsmessungen

Für die Messungen wurden zwei verschiedene Anregungen durchgeführt, welche die Bestimmung von jeweils unterschiedlichen Schwingungsparametern erlaubt.

### 1.1 Daten zufolge heel-drop

Durch die Anregung der Deckenplatte mit Hilfe des heel-drops wurden aus den Messdaten folgende Schwingungsparameter ermittelt:

- Schwingbeschleunigung: Für die unbewertete und bewertete Schwingbeschleunigung (bewertung gemäß ÖNORM ISO 2631-2:2007) zufolge des heel-drops wurde der Scheitelwert und der Effektivwert bestimmt.
- Schwinggeschwindigkeit: Gleich wie bei der Beschleunigung wurden von den Daten für die Schwinggeschwindigkeit der Scheitelwert und Effektivwert des unbewerteten und bewerteten Signals ausgelesen.
- Eigenfrequenzen: Aus dem Frequenzspektrum der unbewerteten Schwingbeschleunigung wurden, soweit bestimmbar, die ersten Eigenfrequenzen bis ca. 25 Hz der gemessenen Decke angegeben.
- effektive Dämpfung: Aus der unbewerteten Ausschwingkurve wurde mit Hilfe des logarithmischen Dekrements in der Zeitdomäne die effektive Dämpfung (Dämpfung zufolge Signal ohne Bandbegrenzung) ermittelt.

- modale Dämpfung der ersten Eigenfrequenz: Mit einem Bandpassfilter wurden die unbewerteten Beschleunigungsdaten auf den Frequenzbereich um die erste Eigenfrequenz gefiltert. Die modale Dämpfung konnte dann im Zeitbereich anhand der Ausschwingkurve mit Hilfe des logarithmischen Dekrements berechnet werden.

## 1.2 Daten zufolge freies Gehen

Aus den Messungen, bei welchen die Decke durch freies Gehen angeregt wurde, werden folgende Daten ausgegeben:

- Schwingbeschleunigung: Bei den Schwingungsdaten zum freien Gehen wurde das arithmetische Mittel der Scheitelwerte der einzelnen Schritte und der Effektivwert über einen Zeitraum von bis zu 30 Sekunden ausgewertet. Als Ausgangsdaten dienten sowohl das unbewertete als auch das nach der Bewertungsfunktion  $W_m$  (gemäß ÖNORM ISO 2631-2:2007) gewichtete Zeitsignal.
- Schwinggeschwindigkeit: Wie bei den Schwingbeschleunigungen erfolgte auch hier die Auswertung des arithmetischen Mittels der Scheitelwerte und der Effektivwert über einen Zeitraum von bis zu 30 Sekunden für das unbewertete und das bewertete Zeitsignal.
- Eigenfrequenzen: Gleich wie beim heel-drop werden aus dem Frequenzspektrum des unbewerteten Beschleunigungssignals nach Qualität des Frequenzspektrums die ersten Eigenfrequenzen bis ca. 25 Hz bestimmt.

## 2 Vorgehensweise bei der Auswertung

Für die mathematische Bearbeitung der aufgezeichneten Signale und die Ergebnisaufbereitung bzw. Bestimmung von Schwingungskennwerten wurden die Programme „Beam 3.12d“ (siehe Kapitel 5. 5. 3 Messprogramm) und Microsoft Excel 2010 verwendet. Da für die Auswertung der Daten unter Anwendung der erwähnten Software im Rahmen dieser Arbeit bestimmte Annahmen getroffen werden mussten, werden diese in den folgenden Abschnitten zusammen mit der mathematischen und programmtechnischen Vorgehensweise beschrieben. Da pro Einzelmessung drei Messpunkte aufgezeichnet wurden (M1 bis M3), wurde für die visuelle Unterscheidung in Diagrammen folgende Farbzuzuweisung getroffen:

M1...	blau
M2...	orange
M3...	grün

## 2.1 Schwingungsgrößen

### 2.1.1 Schwingbeschleunigung

Die Schwingbeschleunigung ist die Einheit, in welcher die Schwingungsantwort der Deckenplatten aufgezeichnet wurde und bildet somit die Basis für alle weiteren Berechnungen. Diese Schwingungsgröße ist auch die Basis für einige Bewertungsverfahren, in welchen mit dieser quantitativ messbaren Größe Bezüge zur subjektiven Wahrnehmung des Menschen hergestellt werden. Grundsätzlich wurden in dieser Arbeit folgende Ausgabewerte der Schwingbeschleunigung bestimmt:

- unbewertete und bewertete Scheitelwerte und Effektivwerte (Zeifenster 1 bzw. 1,8 Sekunden) zufolge heel-drop
- unbewertete und bewertete Scheitelmittelwerte und Effektivwerte zufolge freiem Gehen über einen Zeitraum von bis zu 30 Sekunden

Da den Messungen eine Abtastfrequenz von 1200 Hz zugrunde liegt, beinhaltet das diskretisierte Signal, unter Ausschluss von Aliasingeffekten, auswertbare Frequenzen von bis zu 599 Hz. Interpretationen im Bereich der niederfrequenten Bauakustik (siehe Abb. 6.1), sofern die verwendete Anregungsform dafür geeignet ist, wären dadurch möglich, sind aber nicht Gegenstand dieser Arbeit, weshalb für die weiteren Ausgaben das gemessene Zeitsignal mit einem Bandpass gefiltert wurde. Die Grenzfrequenzen des Bandpasses ergeben sich aus der ÖNORM ISO 2631-2:2007, wonach der relevante Frequenzbereich für Schwingungen in Gebäuden zwischen 1 und 80 Hz liegt. 1 Hz ist zugleich auch die untere Grenze des Messbereichs der Beschleunigungssensoren.

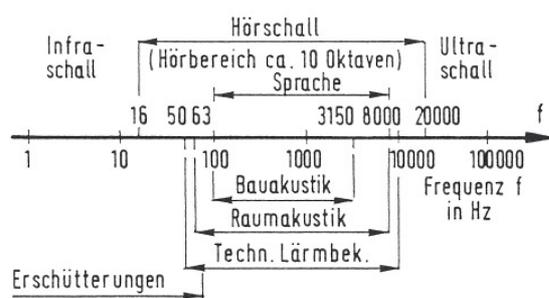


Abb. 6.1 Frequenzbereiche von Schwingungen im Bauwesen [19]

Trotz durchgeführtem Nullabgleich vor jeder Messung konnte bei manchen Zeitsignalen ein sogenannter „Nullpunktfehler“, also eine geringfügige Verschiebung des Mittelwertes des Zeitsignals entlang der y-Achse (Amplitudenachse) festgestellt werden. Die Verschiebungen können auch als Schwingungen mit einer Frequenz nahe 0 Hz interpretiert werden, weshalb diese durch die Anwendung eines Bandpasses („Beam“) mit der unteren Begrenzung von 1 Hz getilgt werden.

Für die bewerteten Ausgaben wurden die Ausgangsdaten mit der in Tabelle A.1 (Schwingbeschleunigung) bzw. Tabelle NA.1 (Schwinggeschwindigkeit) der ÖNORM ISO 2631-2:2007 angegebenen Bewertungskurve  $W_m$  gewichtet (siehe Abb. 6.2). Dies erfolgte in „Beam“ unter Verwendung eines Filters („editierbarer Filter“). Die Endaufbereitung der Daten erfolgte in Excel, wobei die aus „Beam“ im Text-Format exportierten Daten in eine angefertigte Vorlage eingelesen wurden.

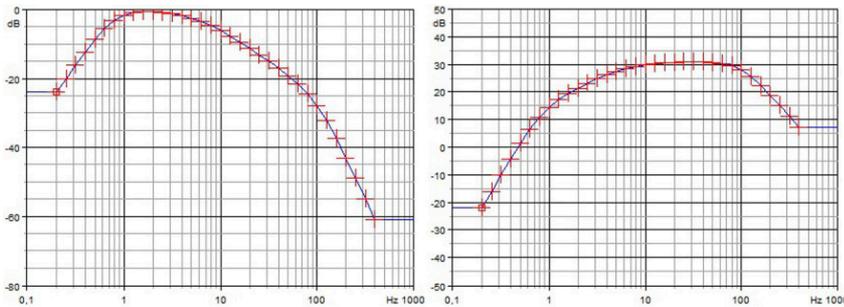


Abb. 6.2 editierbare Filter, wie sie in „Beam“ für die Schwingbeschleunigung (links) und Schwinggeschwindigkeit (rechts) gemäß den Terzbandangaben der ÖNORM ISO 2631-2:2007 eingegeben wurden

Bei der manuellen Bearbeitung in Excel wurden die Zeitfenster für die Zeitsignale anhand der visuellen Ausgabe festgelegt, in deren Rahmen alle weiteren, in *Abschnitt 1* genannten Kenngrößen ausgelesen wurden. Diese Zeitfenster boten zum einen die Möglichkeit, Störeinflüsse sowie Vor- und Nachlaufzeit aus den Ergebniswerten zu exkludieren. Zum anderen ist für die Berechnung und Angabe eines Effektivwertes auch ein bestimmter Zeitrahmen notwendig, in dessen Grenzen die Schwingungsgröße angegeben wird.

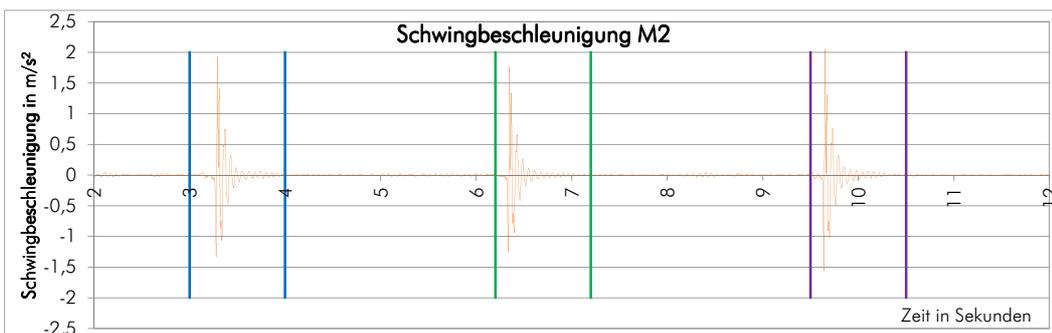


Abb. 6.3 visuelles Bearbeitungsfenster für die Festlegung der Zeitrahmen der auszuwertenden Signale (blaue, grüne und violette Linienpaare) für die Messung BR1\_BP4\_G1\_W1\_P1\_HD3\_01

Die Berechnung des Effektivwertes erfolgte dabei gemäß Gl. [6.1], welche der ISO 2631 entnommen wurde.

$$a_{w, rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad [6.1]$$

mit

$a_w(t)$  zeitabhängige Größe der Schwingbeschleunigung [ $m/s^2$ ;  $mm/s^2$ ]

T Dauer, über welche der Effektivwert gebildet wird [s]

Für die Berechnung des mittleren Scheitelwertes zufolge der Anregung durch freies Gehen wurde ein Algorithmus erstellt, welcher innerhalb des festgelegten Zeitbereichs für den Effektivwert die Amplitudenmaxima und -minima der einzelnen Schritte erkennt (siehe Abb. 6.3). Pro Einzelmessung wird das arithmetische Mittel der Scheitelwerte - wobei die Minima als Absolutbetrag berücksichtigt werden - und die Schrittfrequenz der berücksichtigten Schritte ausgegeben.

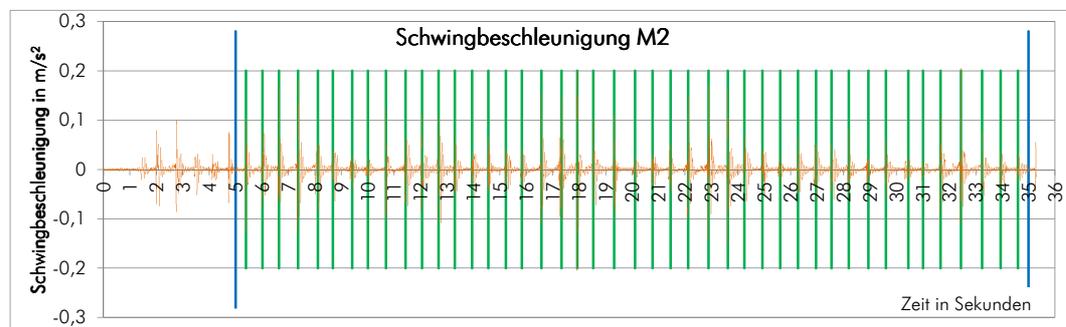


Abb. 6.4 visuelle Ausgabe der erkannten Maxima der einzelnen Schritte (grüne Linien) innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens für den Effektivwert (blaue Linien) für die Messung BR1\_BP4\_G1\_W1\_P1\_FG1\_01

## 2. 2 Schwinggeschwindigkeit

Durch Integration der Schwingbeschleunigung nach der Zeit erhält man die Schwinggeschwindigkeit. Als Eingangsparameter für die Integration diene das bandbegrenzte Beschleunigungssignal (Frequenzbereich 1-80 Hz, siehe Abschnitt 2. 1. 1). Bei der Integration des ungefilterten Signals würde eine konstante vertikale Verschiebung entlang der y-Achse (Nullpunktfehler), wie sie in den Ausgangsdaten trotz Nullabgleich vor der Messung immer wieder vorkommt, zu einer steigenden Abweichung des Geschwindigkeitssignals von der Nullachse führen. Die konstante Verschiebung ergibt sich nach der Integration zu der Steigung  $k$ , in welcher die mittlere Achse der Schwinggeschwindigkeit ansteigt bzw. absinkt. Ersichtlich wird dieser Zusammenhang in Abb. 6.5 an den Signalen in M1 und M3, welche mit Mittelwerten des ungefilterten Beschleunigungssignals von  $0,0114 m/s^2$  und  $0,0154 m/s^2$  nach der Integration eine Steigung gleich den Mittelwerten besitzt. Der annähernd wellenförmige Verlauf von M2 in Abb. 6.5 lässt den Einfluss von niederfrequenten Anteilen mit Frequenzen kleiner als 1 Hz erkennen. Da der Messbereich der Sensoren bei 1 Hz beginnt, sind die Frequenzanteile unterhalb dieser Frequenz von weiteren Betrachtungen auszuschließen, was die Notwendigkeit der unteren Bandpassgrenze von 1 Hz ebenfalls bestätigt.

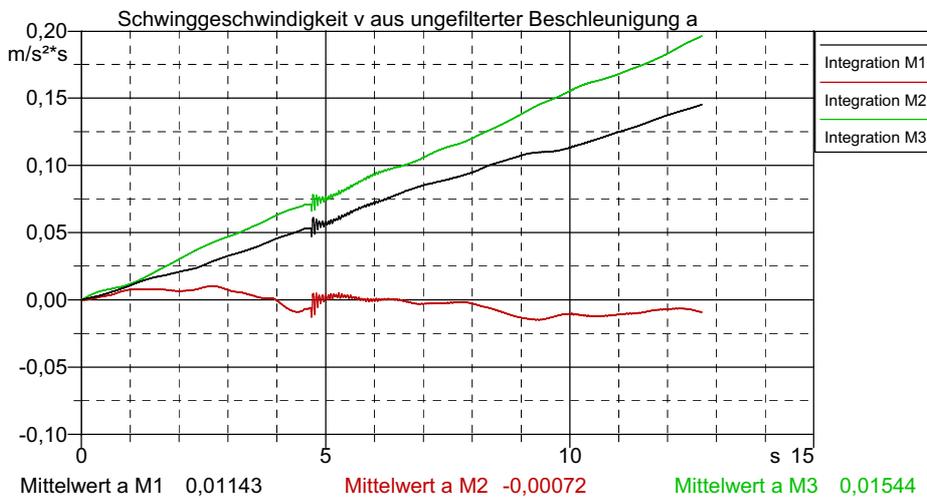


Abb. 6.5 Abweichung der Schwinggeschwindigkeit von der Nullachse bei Integration der ungefilterten Schwingbeschleunigung aus Messung BR1\_BP3\_G1\_W3\_P2\_HD1\_01

Nach der vorhergehenden Bearbeitung (Bandpass, Integration) und gegebenenfalls Gewichtung (gemäß Bewertungsfunktion nach Tabelle NA.1 der ÖNORM ISO 2631-2:2007) in „Beam“ erfolgte die Ergebnisaufbereitung wiederum in Excel, wobei folgende Werte ausgegeben wurden:

- unbewertete und bewertete Scheitelwerte und Effektivwerte (Zeitfenster 1 bzw. 1,8 Sekunden) zufolge heel-drop
- unbewertete und bewertete Scheitelmittelwerte und Effektivwerte zufolge freiem Gehen über einen Zeitraum von bis zu 30 Sekunden

Die Aufbereitung in Excel wurde dabei analog zu der Vorgehensweise der Schwingbeschleunigung (siehe Abschnitt 2. 1. 1) durchgeführt. Ebenfalls übernommen wurden dabei die Zeitgrenzen für die Effektivwerte, welche anhand des Beschleunigungssignales bestimmt werden konnten.

### 2. 2. 1 Ergebnisse

Sämtliche Ergebnisse zu den Schwingungsgrößen der gemessenen Plattenelemente sind in *Anhang D - Ergebnisse der Messungen* angeführt. Da es sich bei den gemessenen Deckenelementen statisch vereinfacht um Einfeldträger handelt, welche in Feldmitte am stärksten angeregt werden, wurden nur die Daten der Messung in Feldmitte (M2) ausgegeben. Um dennoch die Größenordnung der Daten in M1 und M3 qualitativ wiederzugeben, wurde zum Teil die relative Abweichung von M1 bzw. M3 zu M2 mit ausgegeben, wobei M2 als Bezugsbasis fungierte.

## 2.3 Eigenfrequenz

Aus dem unbearbeiteten Zeitsignal der Schwingbeschleunigung wurde in „Beam“ ein lineares Frequenzspektrum ohne Fensterfunktion für jeden der drei simultan gemessenen Punkte (M1 bis M3) berechnet. Nach dem Export als Text-File und Import in Excel erfolgte die visuelle Bestimmung der Eigenfrequenzen bis ca. 25 Hz anhand der Spitzenwerte (Peaks) im Frequenzspektrum. Für eine erste Beurteilung wurden dafür bis zu drei Bereiche um ausgewählte Eigenfrequenzen (beginnend bei der ersten Eigenfrequenz  $f_1$ ) festgelegt, in welchen automatisiert das Maxima samt der zugehörigen Frequenz ausgelesen werden konnte (siehe Abb. 6.6). Für die Endauswertung erfolgte die Bestimmung der restlichen Eigenfrequenzen im Bereich bis ca. 25 Hz manuell.

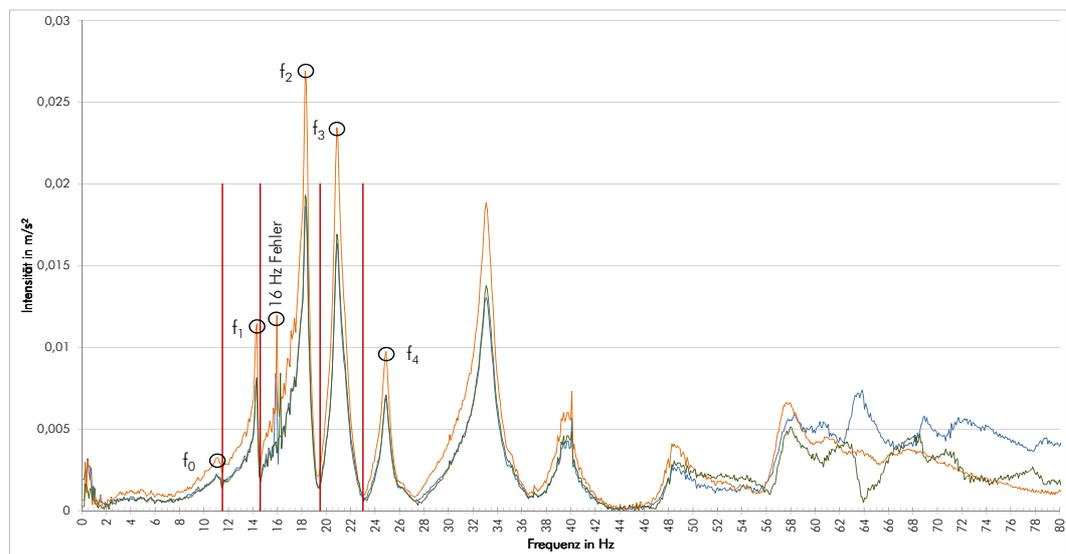


Abb. 6.6 Frequenzspektrum (rote, vertikale Linien markieren Bereichsgrenzen) für die Messung BR1\_BP3\_G1\_W1\_P1\_HD1\_01

Da sich die Spitzen (Peaks) im Frequenzspektrum von Abb. 6.6 im niederfrequenten Bereich bei allen drei Messpunkten bei den jeweils gleichen Frequenzen zu gleichen Intensitäten ausbilden, kann davon ausgegangen werden, dass es sich dabei ausschließlich um erste Eigenformen in Plattenlängsrichtung handelt. Der Unterschied in der Intensität zwischen M1 bzw. M3 und M2 liegt darin begründet, dass die Messpunkte M1 und M3, die in den Viertelpunkten liegen, nicht wie M2 der maximalen Auslenkung zufolge der ersten Eigenform in Plattenlängsrichtung ausgesetzt sind (siehe Kapitel 5. 3. 3 Anordnung der Messpunkte am Element, Abb. 5.9). Erweitert auf alle Messungen konnte anhand dieser Beurteilung keine zweite Eigenform in Plattenlängsrichtung im ausgewerteten Frequenzbereich bis 25 Hz festgestellt werden. Demnach sind die ausgewiesenen Eigenfrequenzen zweidimensionalen Eigenformen zuzuordnen, wobei sich die erste Eigenform in Plattenlängsrichtung (Haupttragrichtung) mit den ansteigenden Eigenformen in Plattenquerrichtung kombinieren lässt (z.B.:  $f_{1,1}$ ,  $f_{1,2}$ ,  $f_{1,3}$ ,...). Da in Plattenquerrichtung keine ergänzenden Messungen durchgeführt wurden, lassen sich die zugehörigen Eigenformen in dieser Plattenrichtung jedoch nicht nachweisen.

Als Bezeichnung der Eigenfrequenzen wurde eine laufende Nummerierung, beginnend mit  $f_1, f_2, \dots$ , gewählt. Während  $f_1$  als Frequenz der ersten Eigenform in Plattenlängs- und Querrichtung ( $f_{1,0}$  bzw.  $f_{1,1}$ ) angesehen werden kann, lässt sich die Zuordnung der Eigenformen für die höheren Frequenzen ( $f_2, f_3, \dots$ ) in der oben genannten Analogie ( $f_2 = f_{1,2}, f_3 = f_{1,3}, \dots$ ) vermuten. Aufgrund der komplexen Einbausituation mit diskontinuierlichen Auflagern, Öffnungen in der Deckenplatte, Plattenstößen und nicht zuletzt Materialinhomogenitäten können auch Eigenformen auftreten, welche nicht der vermuteten Zuordnung entsprechen, weshalb für die Angabe der Eigenfrequenzen von einer Angabe der zugehörigen Eigenformen abgesehen wurde.

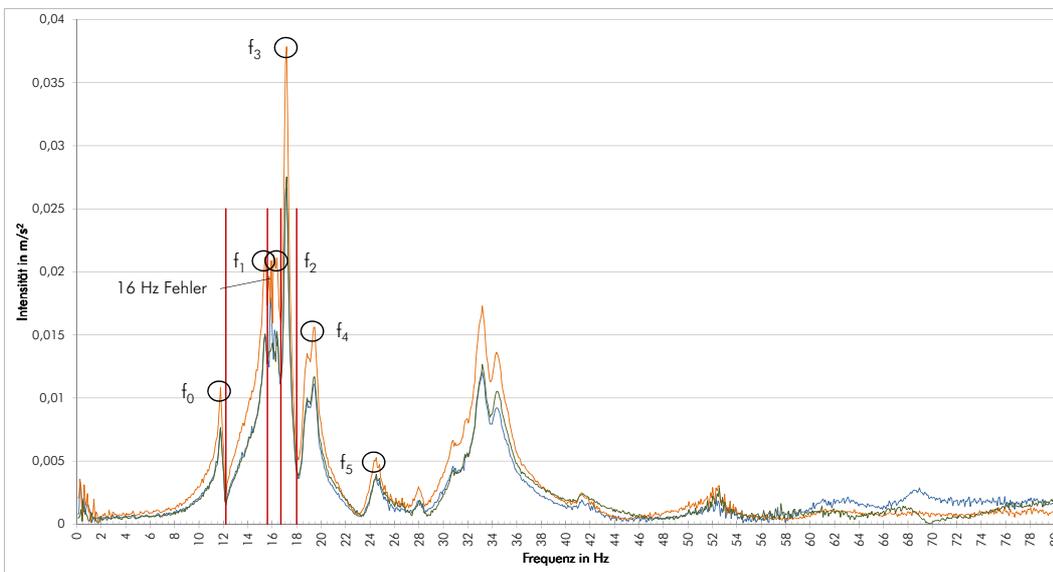


Abb. 6.7 Frequenzspektrum (rote, vertikale Linien markieren Bereichsgrenzen) für die Messung BR1\_BP3\_G1\_W3\_P2\_HD1\_O2

In Abb. 6.6 und Abb. 6.7 ebenfalls ersichtlich ist eine Spitze im Bereich zwischen 11 und 12 Hz. Diese ist in der Rohbauphase je nach Lagerungsbedingung der Platte zum Teil nicht vorhanden und zum Teil stärker ausgeprägt. Da die verstärkte Anregung in diesem Frequenzbereich überwiegend bei Platten mit Fensteröffnungen im Auflagerbereich auftritt, besteht die begründete Vermutung, dass diese Eigenfrequenz eine Folge des örtlich fehlenden Auflagers ist, und erst die darauffolgende Eigenfrequenz im Bereich um die 15 Hz als Eigenfrequenz der ersten Eigenform ( $f_1$ ) in Plattenlängsrichtung zu werten ist. In der weiteren Auswertung wird die Eigenfrequenz im Bereich zwischen 11 und 12 Hz deshalb mit der Bezeichnung  $f_0$  angeführt, falls diese vorhanden ist.

Eine Anomalie, welche sich durchgehend bei allen Frequenzspektren der Messungen mehr oder minder stark abgezeichnet hat, sind einzelne Spitzen („Peaks“) bei 16 Hz ( $\pm 0,05$  Hz). Diese Spitzen, in Abb. 6.6 klar ersichtlich, weichen vom regulären Verlauf in positiver und negativer Richtung ab und erheben den Anschein einer eigenen Eigenfrequenz. Aufgrund der Tatsache, dass diese „Peaks“ jedoch nur durch einzelne Werte verursacht werden und zudem bei allen Messungen durchgehend bei 16 Hz ( $\pm 0,05$  Hz) auftreten, ist es unwahrscheinlich, dass es sich dabei um eine Eigenfrequenz handelt. In

weiterer Folge wurde diese Anomalie daher als Messfehler angesehen und bei der Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

Liegen die Peaks im Frequenzspektrum nahe beieinander, so besteht die Möglichkeit, dass einzelne Eigenfrequenzen aufgrund geringerer Anregung und daraus resultierender geringerer Intensität und Überlagerungen im Frequenzbereich nicht erkannt werden können. Interferieren zwei nahe beieinander liegende Eigenfrequenzen, so kann dies zu Schwebungen (siehe *Abschnitt 3*) führen, welche in einer verstärkten Wahrnehmung der Schwingungen resultieren. Wie in *Abb. 6.7* ersichtlich, ist die Unterscheidung der einzelnen Frequenzen nicht immer eindeutig und lässt sich zum Teil nur im Vergleich von Messungen zufolge unterschiedlicher Anregungsarten (heel-drop, freies Gehen) oder Versuchspersonen mit erhöhter Zuverlässigkeit bewerkstelligen.

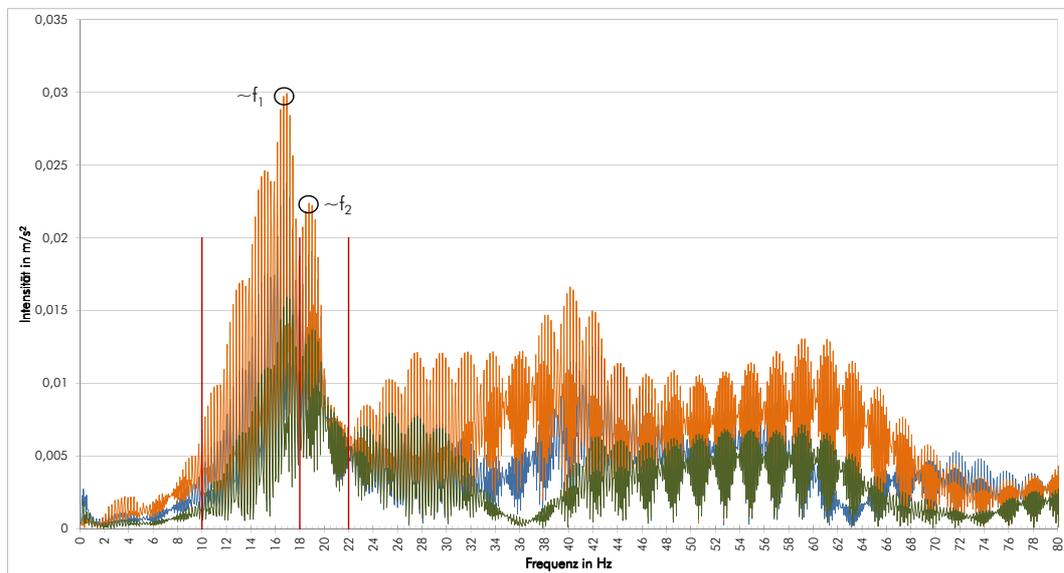


Abb. 6.8 Frequenzspektrum zufolge der ungekürzten Aufzeichnung (rote, vertikale Linien markieren Bereichsgrenzen) für die Messung BR1\_BP4\_G1\_W4\_P6\_HD1\_01

Bei den Messungen in der Ausbauphase wurden für jede Einzelmessung drei heel-drops durchgeführt, um die Anzahl der auswertbaren Ausschwingkurven zu erhöhen. Diese Vorgehensweise führte jedoch zu Frequenzspektren, welche die Bestimmung der Eigenfrequenzen nur mit unzureichender Genauigkeit zuließ (siehe *Abb. 6.8*). In weiterer Folge wurde für das Frequenzspektrum das Zeitsignal auf einen der drei Ausschwingkurven der heel-drops reduziert, wobei die Dauer mit sechs Sekunden festgehalten wurde. Diese Maßnahme ermöglichte eine genauere Bestimmung der Eigenfrequenz, obwohl sich durch die Verkürzung der Zeitdauer die Auflösung des Frequenzspektrums  $\Delta f$  von durchschnittlich 0,06 Hz auf 0,17 Hz verringerte (vgl. *Abb. 6.8* mit *Abb. 6.9*).

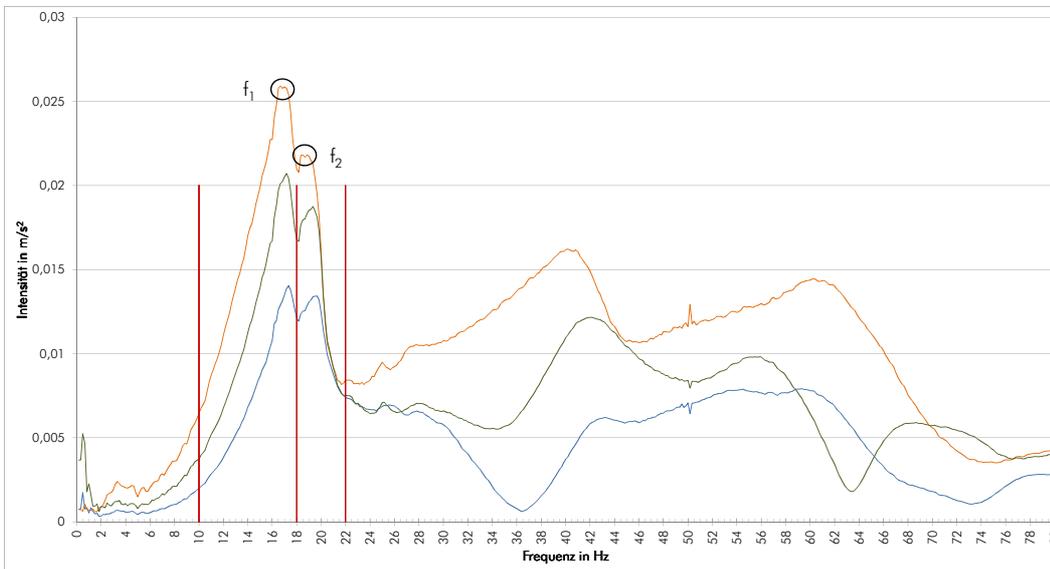


Abb. 6.9 Frequenzspektrum zufolge der gekürzten Aufzeichnung (rote, vertikale Linien markieren Bereichsgrenzen) für die Messung BR1\_BP4\_G1\_W4\_P6\_HD1\_01

Während die Frequenzspektren zufolge der Anregung durch freies Gehen in den Rohbauphasen gleiche Resultate in den Eigenfrequenzen erzielten wie bei der Anregung durch den heel-drop, ergeben sich in den Frequenzspektren der Ausbauphase geringe Unterschiede zwischen den Anregungsarten. So lässt sich am Frequenzspektrum in Abb. 6.10 erkennen, dass beim freien Gehen im Bereich bis 10 Hz eine verstärkte Anregung von Frequenzen auftritt, die ein Vielfaches der Schrittfrequenz darstellen. Die maximale Intensität wird dabei je nach Versuchsperson im Bereich von 6 bis 10 Hz erreicht. Aufgrund der Abzeichnung der Schrittfrequenz im Spektrum und dem Umstand, dass die zugehörige Frequenz des Maximalwertes im Spektrum von der Versuchsperson abhängig ist, lässt sich begründet vermuten, dass es sich dabei primär um eine Schwingungsantwort des Estrichs handelt. Für die Auswertung und Bearbeitung wurde für diese Schwingungsantwort des Systems die Frequenz mit der maximalen Intensität bestimmt und mit der Bezeichnung  $f_x$  angeführt.

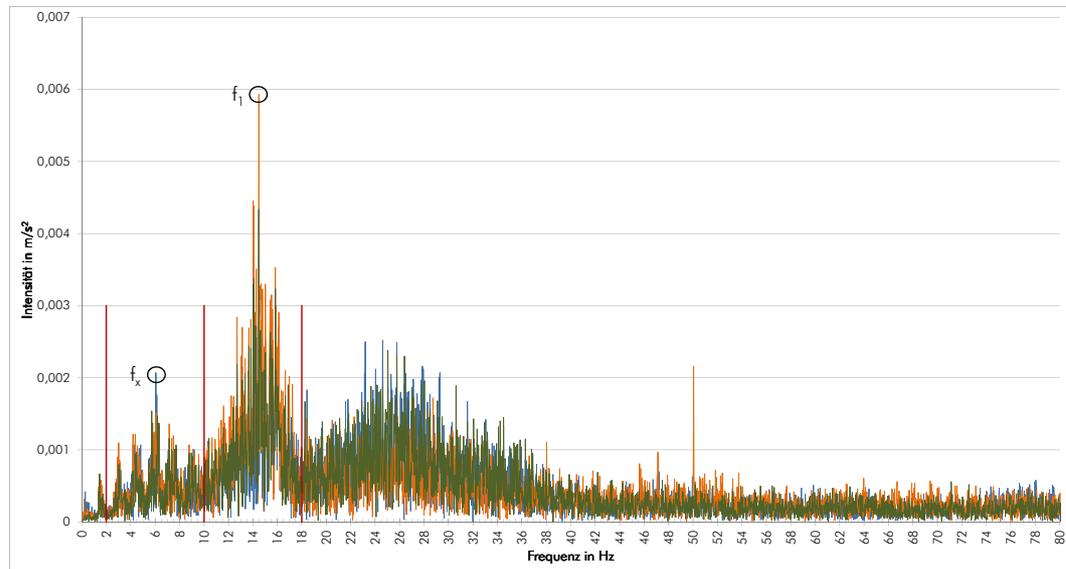


Abb. 6.10 Frequenzspektrum (rote, vertikale Linien markieren Bereichsgrenzen) für die Messung BR1\_BP4\_G1\_W3\_P1\_FG3\_01

### 2. 3. 1 Ergebnisse

Im Anhang D - Ergebnisse der Messungen ist für jedes gemessene Deckenelement ein beispielhaftes Frequenzspektrum aus der Rohbauphase und aus der Ausbauphase wiedergegeben. Die zugehörige tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse sämtlicher Messungen ist darauffolgend in Abschnitt 4. 4 und Abschnitt 4. 5 angeführt.

### 2. 3. 2 Eigenfrequenz aus Zeitsignal

Die Bestimmung der Eigenfrequenz anhand des Zeitsignales wurde für die Berechnungen der Dämpfungswerte zufolge exponentieller Regressionskurven verwendet (siehe Abschnitt 2. 4) und nur in diesem Zusammenhang betrachtet.

## 2. 4 Dämpfung

Die Dämpfung wurde zum einen als effektive Dämpfung und zum anderen als modale Dämpfung der ersten Eigenfrequenz ermittelt. Für die effektive Dämpfung dient die unbewertete jedoch nach ÖNORM ISO 2631-2:2007 bandbegrenzte (1 - 80 Hz) Schwingbeschleunigung als Grundlage. Die Ausschwingkurve des heel-drops, anhand welcher die Dämpfung ermittelt wurde, beinhaltet dabei sämtliche Eigenfrequenzen samt zugehöriger modaler Dämpfungen. Aufgrund größerer Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Ausschwingkurve, welche durch Einschwingphase und multifrequenter Überlagerung teilweise auftreten können, sind die Ergebnisse der effektiven Dämpfung kritisch zu hinterfragen.

Die modale Dämpfung lässt sich aus der eigenfrequenzabhängig bandbegrenzten Ausschwingkurve bestimmen. Dafür wurde anhand des Frequenzspektrums ein relevanter Frequenzbereich um die erste Eigenfrequenz bestimmt (siehe Abb. 6.11). Mit dem festgelegten Frequenzbereich ließ sich dann ein Bandpassfilter erstellen, welcher auf das Zeitsignal der Schwingbeschleunigung angewendet wurde.

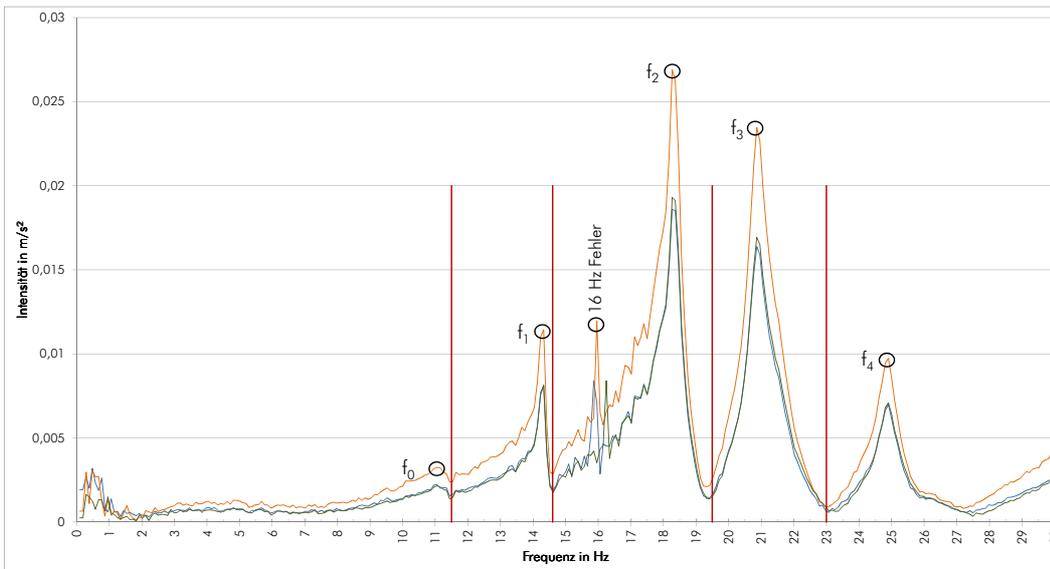


Abb. 6.11 ausgewählter Frequenzbereich (rote Linien markieren die Grenzfrequenzen) um die erste Eigenfrequenz der Messung BR1\_BP3\_G1\_W1\_P1\_HD1\_01

Für die Anwendung des Bandpassfilters wurde bei dieser Auswertung das Messprogramm „Beam“ verwendet. Die Bestimmung der Dämpfung über das logarithmische Dekrement erfolgte wiederum in Excel. Dafür diente ein vom Verfasser erstellter Algorithmus, welcher innerhalb einer zeitlich begrenzten Ausschwingkurve die aufeinanderfolgenden Amplituden im positiven und negativen Bereich erkennt (siehe Abb. 6.12). Anhand dieser isolierten Amplitudenmaxima und -minima konnte nach festgelegter Anzahl der zu verwendenden, vollständigen Schwingungen (Rohbauphasen: 10 Amplituden, Ausbauphase: 6 Amplituden) und Bestimmung der ersten Amplitude der freien Ausschwingkurve das logarithmische Dekrement zufolge der Amplitudenunterschiede gebildet werden (siehe Kapitel 4. Ausschwingversuch). Pro Ausschwingkurve ergaben sich so zwei Werte für die Dämpfung (zufolge positiver und negativer Amplituden), welche arithmetisch gemittelt auf einen Wert zusammengefasst wurden.

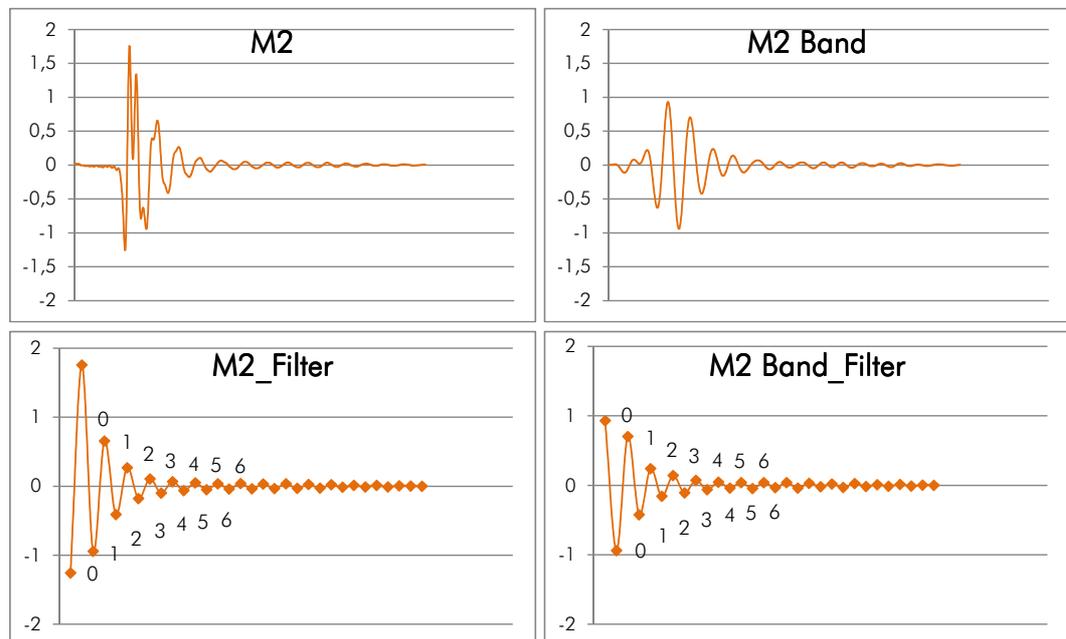


Abb. 6.12 Ausschwingkurve, bandbegrenzte Ausschwingkurve (oben) und die erkannten Maxima und Minima (unten) zufolge eines heel-drops in der Ausbauphase (BR1\_BP4\_G1\_W1\_P1\_HD3\_01)

#### 2. 4. 1 Einflussgrößen und Genauigkeit

Da es sich bei den gemessenen Ausschwingkurven um multifrequente Schwingungen mit teilweise nahe beieinanderliegenden Eigenfrequenzen handelt, ist die Bestimmung des logarithmischen Dekrements demzufolge teilweise mit Ungenauigkeiten behaftet. Im Folgenden wird auf drei Einflüsse eingegangen, welche für die Höhe des logarithmischen Dekrements und somit folglich für das Dämpfungsmaß (Lehr'sche Dämpfung) von wesentlicher Bedeutung sind.

#### Anzahl der Amplituden

Wie schon in Kapitel 4. 1. 4. 1 *Bestimmung von Dämpfungswerten aus Versuchen* beschrieben, hat die Anzahl der berücksichtigten Amplituden für die Bestimmung der Dämpfung insofern einen Einfluss, als dass sich gegen Ende der Ausschwingkurve durch die verändernden Dämpfungsmechanismen (z.B.: Rückgang der Dissipation durch äußere Reibung, aufgrund geringerer Schwingungsamplituden) die Dämpfung insgesamt verringert. [19]

Als erste („freie“) Schwingung für die Auswertung wird jene des eingeschwingenen Zustandes herangezogen, welche sich nach der durch die impulsartige Anregung des heel-drops induzierte, kurzen Einschwingphase für die modale Dämpfung durchgehend zu der zweiten Schwingungsamplitude der Ausschwingkurve ergibt. Bei der effektiven Dämpfung ergab sich die erste Amplitude der freien Schwingung, aufgrund höherfre-

quenter Überlagerungen, gelegentlich erst in der neunten Amplitude der Ausschwingkurve, was mitunter Vergleichbarkeit und Anwendbarkeit der gewonnenen Werte in Frage stellt.

		Anzahl der berücksichtigten Schwingungen								
BR2	BP3	G1	W1	P5	HD1	02	8 Schw.	10 Schw.	12 Schw.	14 Schw.
modale Dämpfung $\zeta_1$							3,18%	2,84%	2,37%	2,32%

		Anzahl der berücksichtigten Schwingungen								
BR2	BP4	G1	W1	P5	HD3	02	5 Schw.	6 Schw.	7 Schw.	8 Schw.
modale Dämpfung $\zeta_1$							6,02%	5,83%	5,68%	5,59%

Tab. 6.1 Vergleich von modalen Lehr'schen Dämpfungsmaßen zufolge unterschiedlicher Anzahl an berücksichtigten Schwingungen

In Tab. 6.1 lässt sich an den modalen Dämpfungsmaßen der Platte P5 aus Haus 2 (1.OG) in beiden Bauphasen die erwähnte Abnahme der Dämpfung bei steigender Anzahl an berücksichtigten Schwingungen verfolgen. Dem Autor sind aufgrund der Recherche keine Regelungen bekannt, welche festlegen, wieviele Werte für eine Bestimmung der Dämpfung anhand einer Ausschwingkurve zu berücksichtigen sind bzw. einen Verhältnisgrenzwert angeben, ab welchem die nachfolgenden Schwingungsamplituden nicht mehr in die Berechnung mit einbezogen werden sollten. Für die Auswertung der Messdaten wurde diesbezüglich die Vorgehensweise von Hamm [12] bzw. Winter/Hamm/Richter [26] übernommen und die Anzahl der berücksichtigten Schwingungsamplituden konstant über alle Messungen gleicher Bauphase festgelegt (Rohbauphasen: 10 Amplituden, Ausbauphase: 6 Amplituden).

## Bandpassvariation

Da die Eigenfrequenzen der Deckenelemente mitunter sehr nahe beieinander liegen, finden zum Teil Überlagerungen statt, welche die exakte Eingrenzung des Schwingungssignals auf die Anteile einer einzelnen Eigenfrequenz mit Hilfe eines einfachen Bandpassfilters nicht ermöglichen. Die Grenzen der Frequenzbereiche für die modalen Dämpfungswerte  $\zeta_1$  wurden, sofern ersichtlich, in den Tiefpunkten zwischen den einzelnen Peaks gewählt (siehe Abb. 6.11). Verschiebt man die obere oder untere Grenze dabei nur um 0,5 Hz, so ergeben sich in den Dämpfungswerten markante Änderungen.

Für die Messung BR1\_BP3\_G1\_W1\_P1\_HD1\_01 ist das zugehörige Frequenzspektrum in Abb. 6.11 dargestellt, demzufolge sich ein Frequenzbereich von 11,5 bis 14,6 Hz für die erste Eigenfrequenz ergibt. Durch das Verschieben der unteren und/oder der oberen Grenze um 0,5 bis 1 Hz ergeben sich die in Tab. 6.2 angegebenen Werte für die modale Dämpfung, welche in einem Bereich von 1,62 bis 2,9 % schwanken. Für jene Frequenzbereiche, welche offensichtlich Schwingungsanteile von benachbarten Eigenfrequenzen mit abbilden, ergibt sich eine um bis zu 0,96 % höhere Dämpfung, während der schmalbandigere Frequenzbereich von 12,5 bis 14,6 Hz die Dämpfung von 1,94 % (für 11,5-14,6 Hz) um absolute 0,32 % unterschreitet. Die absolute Überschreitung um

0,33 %, welche das ebenfalls schmalbandig begrenzte Signal (12-14,6 Hz) gegenüber über den 1,94 % (11,5-14,6 Hz) aufweist, ist in diesem Zusammenhang vermutlich auf Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Ausschwingkurve zurückzuführen, wurde aber nicht näher untersucht.

BR1 BP3 G1 W1 P1 HD1 O1	Frequenzbereich [Hz]					
	11-14,6	12-14,6	12,5-14,6	11,5-14,6	11,5-15	11-15
modale Dämpfung $\zeta_1$	2,30%	2,27%	1,62%	1,94%	2,83%	2,90%

Tab. 6.2 Vergleich von modalen Lehr'schen Dämpfungsmaßen zufolge unterschiedlicher Bandpassgrenzen

Die Art und Weise der gewählten Bandpassgrenzen für die Bestimmung der modalen Dämpfung geben nach Meinung des Autors den Sachverhalt der vorhandenen Dämpfung in Bezug auf die angewendete Auswertungsmethode am genauesten wieder. Dass die Dämpfung zufolge des Frequenzbereiches 11,5 bis 14,6 Hz zudem das nahezu geringste Ergebnis erzielt, lässt vermuten, dass diese Frequenzbandwahl die berechnete Dämpfung, auf der sicheren Seite liegend, geringer ausfallen lässt als diese tatsächlich vorhanden ist.

## Schwebungen

Ebenfalls eine Folge von nahe beieinander liegenden Eigenfrequenzen sind Schwebungen (siehe Abschnitt 3). Da solche Eigenfrequenzen im Spektrum zum Teil nicht erkennbar sind, können diese mithilfe der Bandpassgrenzen nicht separiert werden, weshalb sich Schwebungen mitunter auch in bandbegrenzten Signalen abzeichnen. Zum Teil können diese Schwebungseffekte des bandbegrenzten Signals auch aus Überlagerungen von Frequenzanteilen im Grenzbereich zur nächsten bestimmbaren Eigenfrequenz resultieren (siehe Abschnitt Bandpassvariation).

Zeichnet sich in der Ausschwingkurve eine Schwebung ab, so kann diese, je nachdem wie der Start- und Endwert für das logarithmische Dekrement gewählt wird, das Ergebnis für die Dämpfung verfälschen. So ergibt sich in Abb. 6.13 für den Startwert  $O_1$  bis zum Endwert  $11_1$  ein Dämpfungsmaß von 2,3 % anstelle der 1 % der ursprünglichen Grundsignale. Ebenso ist wie im Falle von  $O_2$  bis  $11_2$  mit 0,6 % auch eine Unterbewertung der Dämpfung möglich.

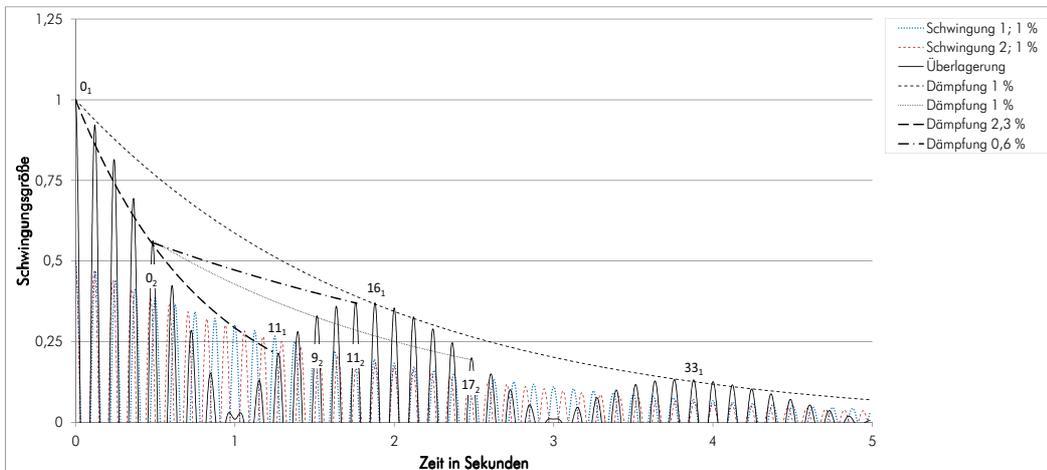


Abb. 6.13 Vergleich von Lehr'schen Dämpfungsmaßen zufolge unterschiedlicher Wertebereiche bei einem Signal mit Schwebung ( $f_1 = 8 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 8,5 \text{ Hz}$ ; negativer Bereich nicht dargestellt)

Bei der Auswertung der modalen Dämpfungen konnten eventuell vorhandene Schwebungseffekte nicht näher berücksichtigt werden, da primär auf die Beibehaltung durchgehend gleicher Start- und Endwerte Wert gelegt wurde. Diese hätten andernfalls entsprechend der Schwebung individuell angepasst werden müssen, was wiederum zu einer unterschiedlichen Anzahl von berücksichtigten Schwingungen geführt hätte (siehe Abschnitt Anzahl der Amplituden).

Im bandbegrenzten Signal zeichnen sich eventuell vorhandene Schwebungen zwar nur mit geringer Ausprägung ab, können aber dennoch zu Fehleinschätzungen der Dämpfung führen. Bei Vergleichen von Dämpfungswerten von Platten mit unterschiedlicher Lagerung sollte, aufgrund lagerungsbedingter unterschiedlicher Überlagerungen von Eigenfrequenzen, bedacht werden, dass mögliche Schwebungseffekte die Relationen verfälschen können. Für quantitative Angaben von Dämpfungsmaßen sollten aufgrund von Schwebungseffekten und anderen Unsicherheiten deshalb nur statistische Werte mit einer möglichst großen Grundgesamtheit verwendet werden.

#### 2. 4. 2 Umhüllende Exponentialfunktion

Ergänzend erfolgte anhand der isolierten Schwingungsamplituden die Berechnung einer exponentiellen Regressionsfunktion über dessen Exponenten und der Eigenkreisfrequenz die Dämpfung rückgerechnet werden kann. Dabei wurde mit der Excel-Funktion „Steigung(ln(Daten\_Y);Daten\_X)“ die Steigung  $a$  berechnet, welche dem Term  $-\zeta \cdot \omega_0$  aus Gl. [6.2] entspricht. Der Betrag der Steigung  $a$ , dividiert durch die Eigenkreisfrequenz, ergibt demzufolge das Lehr'sche Dämpfungsmaß  $\zeta$ . Die Eigenkreisfrequenz für diese Berechnung wurde durch Abzählen der Schwingungen der jeweiligen Ausschwingkurve bestimmt. Da sich je nach Verlauf der Ausschwingkurve die Regressionskurve teilweise nur mit geringer Genauigkeit (Bestimmtheitsmaß  $< 0,90$ ) annähern lässt und die Bestimmung der Eigenkreisfrequenz ebenfalls Diskrepanzen unterliegt, wird diese

Form der Berechnung nur als begleitende Kontrolle für die Auswertung erwogen und nicht für die quantitative Angabe von Dämpfungswerten herangezogen.

$$e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot T} \quad (\text{vgl. Gl. [2.21]}) \quad [6.2]$$

Im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet, ist für weitere Arbeiten jedoch zu ermitteln bzw. in einem detaillierten Vergleich abzuschätzen, ob die umhüllende Exponentialfunktion nicht zu genaueren Ergebnissen führt. Speziell im Falle von Schwebungen und Unregelmäßigkeiten im Signal fließen, anders als beim logarithmischen Dekrement, bei der umhüllenden Exponentialfunktion nicht nur der erste und letzte Wert in die Berechnung mit ein, sondern auch sämtliche Amplituden innerhalb des vorgegebenen Intervalls.

### 2. 4. 3 Ergebnisse

Die Ergebnisse für die berechneten Dämpfungswerte sind in *Anhang D - Ergebnisse der Messungen* tabellarisch zusammengefasst. Dieser Zusammenfassung sind unter anderem auch die Frequenzbereiche für die modalen Dämpfungen, die berücksichtigte Anzahl an Schwingungen und die Nummer der ersten Schwingung (Startwert), welche für die Bestimmung der Dämpfung berücksichtigt wird, zu entnehmen. Die Dämpfungsmaße selbst werden zum einen für jeden Messpunkt arithmetisch gemittelt über sämtliche Messungen einer Platte angegeben, wobei die relative Abweichung zwischen Versuchsperson 1 (Bezugsbasis) und Versuchsperson 3 ergänzend angeführt wurde. Weiters wurde für sämtliche Dämpfungswerte einer Platte (innerhalb einer Bauphase) das arithmetische Mittel, der Median und das 5%-Fraktil ausgegeben.

### 3 Schwebungen

Eine Schwebung ist eine Interferenz (Überlagerung) zweier Schwingungen. Desto näher die beiden Frequenzen beieinander liegen, desto ausgeprägter zeichnet sich die Überlagerung in der Zeitdomäne ab, vorausgesetzt, beide Schwingungsamplituden sind ebenfalls annähernd gleich groß (siehe Abb. 6.14).

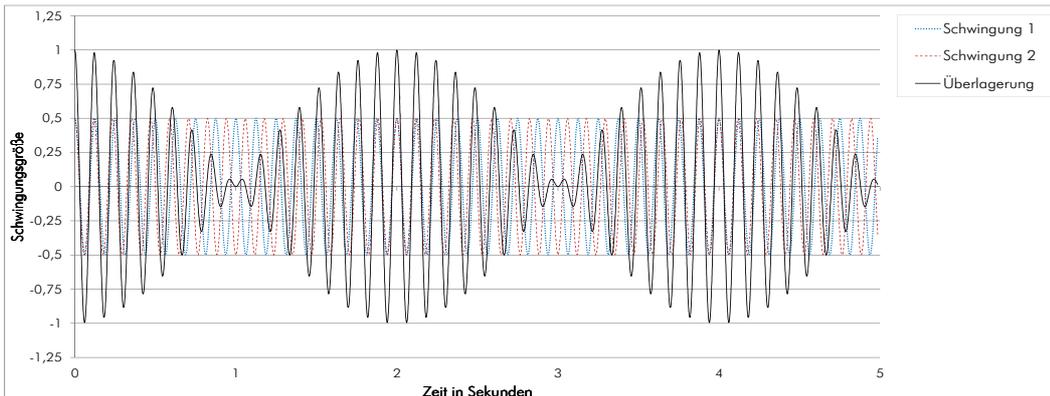


Abb. 6.14 Überlagerung von stationären harmonischen Schwingungen ( $f_1 = 8 \text{ Hz}$ ;  $f_2 = 8,5 \text{ Hz}$ )

Je nach Dämpfung kann sich eine Schwebung auch am transienten Signal noch stark abzeichnen (siehe Abb. 6.15). Nach Ohlsson [17] können Schwebungen die Wahrnehmung von Schwingungen verstärken und so die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigen. Eine verstärkte Dämpfung der einzelnen Frequenzen wirkt sich dabei insofern positiv aus, als dass diese die Anzahl und die Höhe der überlagerten Amplituden reduziert. Auch Ljunggren et al. (siehe Kapitel 3. 1. 10 Ljunggren und Ljunggren et al. (aus [23])) stellten in ihren Untersuchungen einen Zusammenhang von erhöhter Wahrnehmung bei Überlagerung von zwei Frequenzen fest und führten dies auf die Schwebungseffekte zurück. Es wird darauf hingewiesen, dass die Betrachtung höherer Eigenfrequenzen für die Beurteilung des Schwingungsverhaltens einer Decke hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit notwendig ist, da diese einen wesentlichen Beitrag der Schwingungsantwort, hinsichtlich der Schwinggrößen ausmachen. Nach Meinung des Autors ist die verstärkte Wahrnehmung höherer Eigenfrequenzen mit wesentlichem Anteil an der Gesamtintensität zum Teil darin begründet, weil bei einer ungünstigen Interferenz durch die Schwebung eine niedrigere Frequenz mit stärkerer Amplitude suggeriert wird.

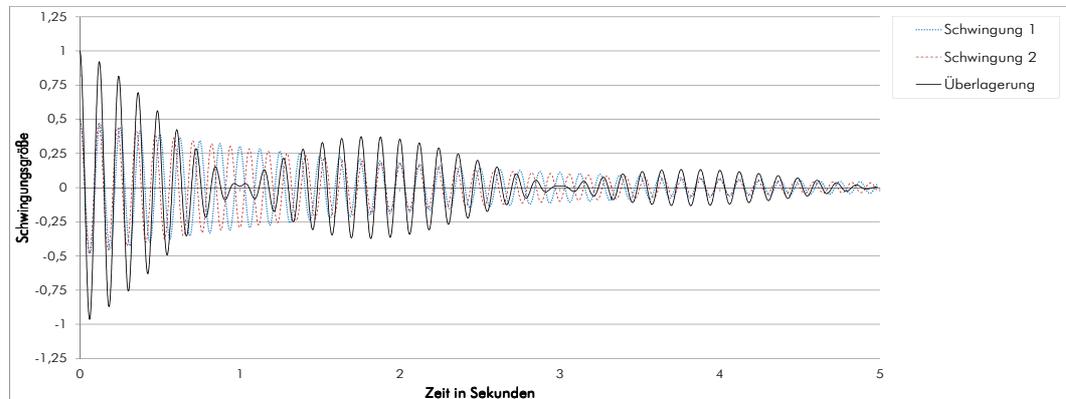


Abb. 6.15 Überlagerung von transienten Schwingungen ( $f_1 = 8 \text{ Hz}$ ,  $\zeta_1 = 1 \%$ ;  $f_2 = 8,5 \text{ Hz}$ ,  $\zeta_2 = 1 \%$ )

Liegen zwei Eigenfrequenzen eines Systems zu nahe beieinander, so können diese im Frequenzspektrum unzureichend bzw. nicht bestimmt werden. Auch im Zeitsignal ist selbst bei geringen Dämpfungen der Schwebungseffekt kaum bzw. nicht mehr erkennbar (siehe Abb. 6.16)

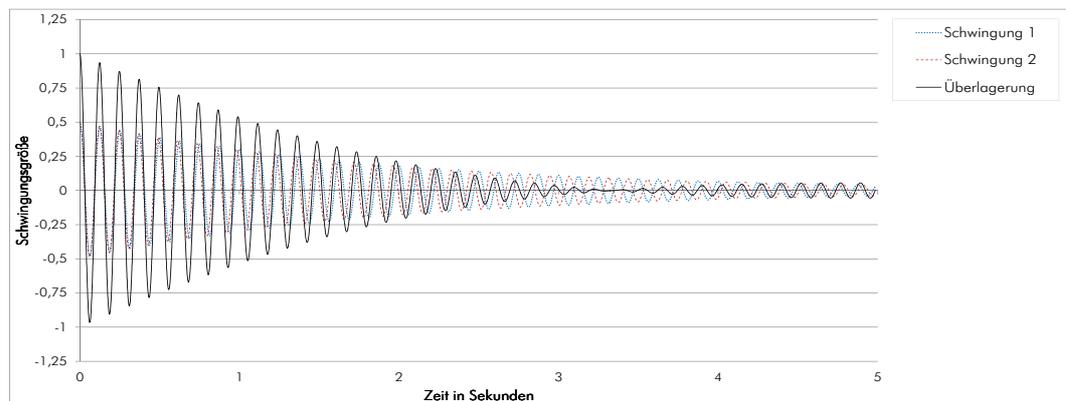


Abb. 6.16 Überlagerung von transienten Schwingungen ( $f_1 = 8 \text{ Hz}$ ,  $\zeta_1 = 1 \%$ ;  $f_2 = 8,15 \text{ Hz}$ ,  $\zeta_2 = 1 \%$ )



## Analyse der Daten

Einleitend zur Analyse der Daten ist zu erwähnen, dass für die subjektive Bewertung der einzelnen Deckenelemente - bis auf die Platten P4 und P6 mit 1-2 bzw. 2 in den Rohbauphasen - durchgehend die Note 1 vergeben werden konnte (vgl. *Anhang C - Ergebnisse der subjektiven Bewertung*). Aufbauend auf die Bewertungskriterien nach Kreuzinger/Mohr (siehe Tab. 3.2 in *Kapitel 3. 1. 8 Kreuzinger und Mohr* [14]) werden Bewertungen bis zur Note 2 als nicht störend eingestuft. Da zudem in der Ausbauphase durchgehend die Note 1 vergeben wurde, sind alle untersuchten Deckenelemente im Sinne dieser Bewertung selbst für hohe Anforderungen als geeignet einzustufen, weshalb im weiteren Verlauf der Analyse auf die subjektive Bewertung nicht mehr explizit eingegangen wird.

### 1 Einbauunabhängige Eigenschaften

Unter einbauunabhängigen Eigenschaften werden Zusammenhänge in den Messdaten erachtet, welche nicht dem Einfluss der Einbausituation zuzuordnen sind. Darunter fällt im Allgemeinen der Einfluss der Anregung durch unterschiedliche Versuchspersonen und zum Teil Unterschiede, welche aus den unterschiedlichen Messpositionen resultieren.

#### 1. 1 Einfluss der Versuchsperson

Da sämtliche Deckenelemente durch zwei verschiedene Versuchspersonen angeregt wurden und diese unterschiedliche Eigenschaften bezüglich Masse, Schuhwerk, Fallhöhe und Schrittfrequenz beim freien Gehen aufwiesen, wird im Folgenden auf mögliche, daraus resultierende Unterschiede in den Messergebnissen eingegangen.

##### 1. 1. 1 Schwingungsgrößen

Gemittelt über alle Ausgabeparameter von Schwingbeschleunigung und Schwinggeschwindigkeit erzielte VP3 bezogen auf VP1 (Bezugsbasis) in den Rohbauphasen beim freien Gehen um 12 % höhere und beim heel-drop um 28 % geringere Werte. In der Ausbauphase liegen die Unterschiede bei 0 % für die Anregung durch freies Gehen und

bei 12 % geringeren Werten für die Anregung durch den heel-drop (vgl. *Anhang D - Ergebnisse der Messungen*). Diese Tendenz lässt sich auch am Beispiel des Effektivwertes der Schwingbeschleunigung für freies Gehen (Abb. 7.1) und heel-drop (Abb. 7.2) erkennen, für welchen sämtliche Ergebnisse der jeweiligen Versuchsperson berücksichtigt wurden.

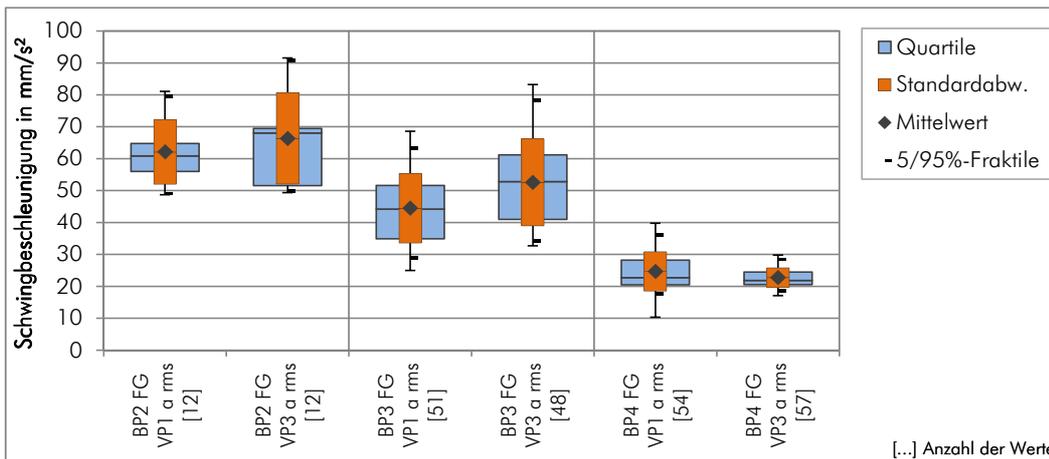


Abb. 7.1 Effektivwert der Schwingbeschleunigung bei freiem Gehen für VP1 und VP3 in BP3 und BP4

Nach Meinung des Verfassers resultiert der Unterschied beim freien Gehen vorwiegend aus dem Masseunterschied der Versuchspersonen, der sich umso stärker ausprägt, desto größer der Masseanteil der Versuchsperson in Bezug auf die Decke ist (Ausbauphase ~ 0 % zu Rohbauphase 12 %). Versuchspersonabhängige Schrittfrequenzunterschiede können zwar je nach Eigenfrequenz des Deckenelementes auch zu solchen Unterschieden führen, sind aber bei den betrachteten Messungen äußerst gering bzw. nicht vorhanden.

In Abb. 7.1 ist ebenfalls ersichtlich, dass mit steigender Ausbaustufe (BP2, BP3, BP4) die Schwingungsantwort der Decke geringer ausfällt, was mit steigenden Systemsteifigkeiten bzw. höheren Deckenmassen und Dämpfungsmaßen begründbar ist (siehe *Abschnitt 2*).

Bei den Messungen des heel-drops gelten vermutlich dieselben Zusammenhänge zwischen den Massen der Versuchspersonen und deren verhältnismäßiger Anteil an der angeregten Deckenmasse. Dass dennoch konträr zu den Erwartungen die Schwinggrößen zufolge der Anregung durch VP3 im Mittel um ca. 28 % bzw. 12 % geringer ausfallen als bei VP1, könnte Folge des unterschiedlichen Schuhwerks im Zusammenhang mit anatomiebedingten unterschiedlichen Fallhöhen sein, wodurch sich andere Lastcharakteristiken einstellen (kürzere Einwirkungsdauer mit größerem Kraftmaximum bei VP1 im Gegensatz zu längerer Einwirkungsdauer und geringerem Kraftmaximum bei VP3). Weiters ist in Abb. 7.2 zu beobachten, dass die Schwingbeschleunigung von VP1 beim heel-drop mit steigender Ausbaustufe, gleich wie beim freien Gehen, einen Rückgang verzeichnet, wohingegen VP3 einen konstanten Verlauf besitzt. Im Rahmen dieser Arbeit konnten jedoch bezüglich dieser beiden Umstände keine tieferegehenden Untersuchungen durchgeführt werden.

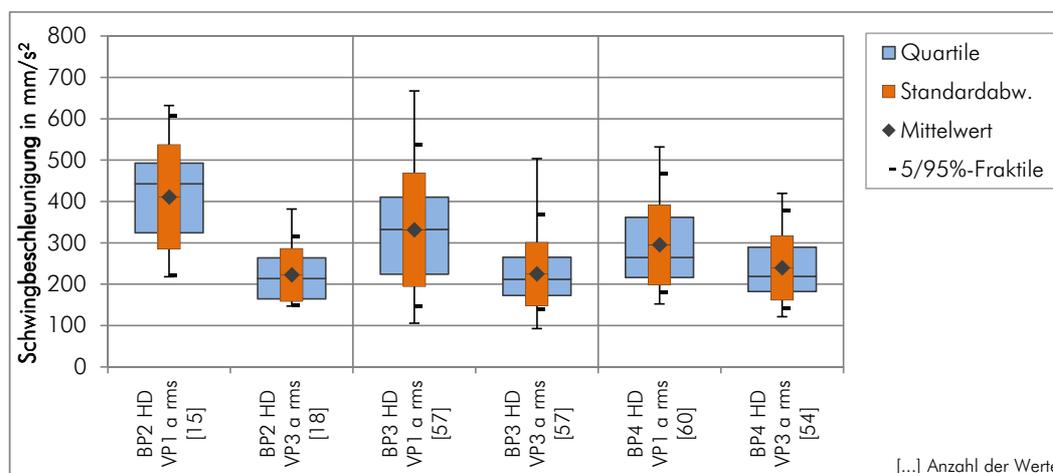


Abb. 7.2 Effektivwert der Schwingbeschleunigung bei heel-drop für VP1 und VP3 in BP3 und BP4

Da sich, wie oben beschrieben, versuchspersonenabhängige Unterschiede zwar generell abzeichnen, jedoch immer wieder gegensätzliche Abweichungen vorliegen, wurden für die Ausgabe der Schwingungsgrößen die Ergebnisse aller Versuchspersonen (vereinzelte Messungen inklusive VP2) zusammengefasst. Folglich wird eine statistische Betrachtung unter Einbeziehung aller gewonnenen Ergebnisse eines Deckenelementes vom Autor als ausreichend erachtet, und deshalb in den ausgegebenen Daten keine weitere Unterscheidung in Bezug auf die Versuchsperson getätigt.

### 1. 1. 2 Eigenfrequenzen

Erhöht man die Masse des schwingungsfähigen Systems, ohne die Spannweite und Steifigkeit zu verändern, so führt dies zu geringeren Eigenfrequenzen. Diesbezüglich hat auch die Masse der Versuchsperson einen Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften der Decke. Vergleicht man die Masse der Versuchspersonen, so ergibt sich eine maximale Differenz von 17 kg zwischen VP2 und VP3 (siehe Tab. 5.4 in Kapitel 5. 4. 4 Versuchspersonen) bzw. 10 kg zwischen VP1 und VP3. Da sich in den ausgewerteten Eigenfrequenzen infolge der Anregung durch unterschiedliche Versuchspersonen keine diesbezüglichen Trends abzeichnen und die Streuungen generell sehr gering sind, scheint der Gewichtsunterschied, bezogen auf das Gesamtsystem, vernachlässigbar gering zu sein (vgl. Anhang D - Ergebnisse der Messungen). In weiterer Folge werden deshalb für Betrachtungen von Eigenfrequenzen die Werte sämtlicher Versuchspersonen zusammengefasst.

### 1. 1. 3 Dämpfungen

Vergleicht man die Höhe und die Richtung (positiv/negativ) der Abweichungen der Dämpfungsmaße von VP3 zu VP1, so lassen sich diesbezüglich keine Regelmäßigkeiten erkennen, weshalb eine Abhängigkeit der Dämpfung hinsichtlich unterschiedlicher Eigenschaften der Versuchspersonen (Masse, Schuhwerk) anhand der vorliegenden

Daten nicht abgeleitet werden kann (siehe *Anhang D - Ergebnisse der Messungen*). Deshalb werden, um eine größere Grundgesamtheit der Daten zu erhalten, die Dämpfungswerte von unterschiedlichen Versuchspersonen als gleichwertig erachtet und in weiteren Betrachtungen keine diesbezüglichen Unterscheidungen vorgenommen.

## 1. 2 Einfluss der Messposition

Die zeitgleiche Messung von drei verschiedenen Punkten eines Deckenelementes erhöht die Anzahl der Messdaten, wodurch die Aussagekraft bei quantitativen Angaben erhöht wird. Es gilt jedoch zu beachten, dass unterschiedliche Punkte auf der Platte auch unterschiedliche dynamische Eigenschaften aufweisen können, was eine differenzierte Vorbeurteilung notwendig macht.

### 1. 2. 1 Schwingungsgrößen

Da es sich bei den gemessenen Schwingungsantworten überwiegend um Kombinationen von Eigenformen erster Art in Plattenlängsrichtung mit höherer Art in Querrichtung handelt, werden für die Ausgabe der Schwinggrößen nur die Ergebnisse in Position M2 ausgegeben. Dies begründet sich darin, dass M2, in der Mitte befindlich, am Punkt der maximalen Auslenkung zufolge der vorhandenen Eigenformen liegt (siehe Abb. 5.9 in *Kapitel 5. 3. 3 Anordnung der Messpunkte am Element*) und somit gegenüber M1 und M3 die maßgebendsten (=höchsten) Schwingungsgrößen (Schwingbeschleunigung und Schwinggeschwindigkeit) verzeichnet. Am Beispiel des Effektivwertes der Schwingbeschleunigung ergaben sich diesbezüglich in den Rohbauphasen relativ um 23,8 % (M2 = Bezugsbasis) geringere Werte bei der Anregung durch freies Gehen und heel-drop für M1 und M3 als in M2 (siehe Abb. 7.3 und Abb. 7.4). In der Ausbauphase ließen sich beim freien Gehen nur geringe relative Unterschiede von 4,3 % feststellen, wohingegen M2 beim heel-drop mit um 42,3 % größeren Werten erhöhte Differenzen aufweist.

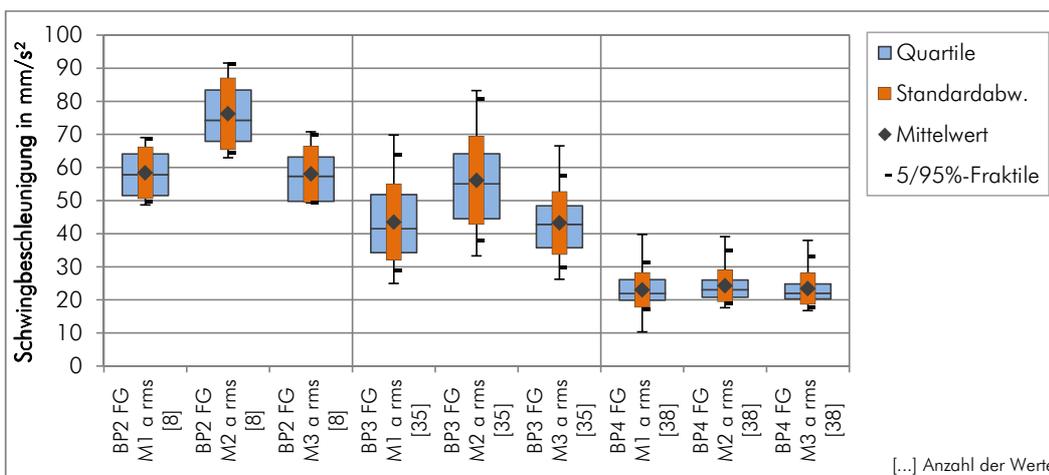


Abb. 7.3 Effektivwert der Schwingbeschleunigung bei freiem Gehen für M1 bis M3 in BP2, BP3 und BP4

Die stärkeren Unterschiede beim heel-drop in der Ausbauphase begründen sich im Wesentlichen in der Trittschalldämmung und der, gegenüber den tragenden BSP-Elementen, geringeren Biegesteifigkeit des Estrichs, was eine verminderte Weiterleitung des anregenden Impulses zur Folge hat (siehe Abb. 7.4). Da die Anregung durch den heel-drop direkt neben M2 in der Mitte des Deckenelementes stattgefunden hatte, konnten in M2 gegenüber M1 und M3 verstärkt größere Amplituden aufgezeichnet werden.

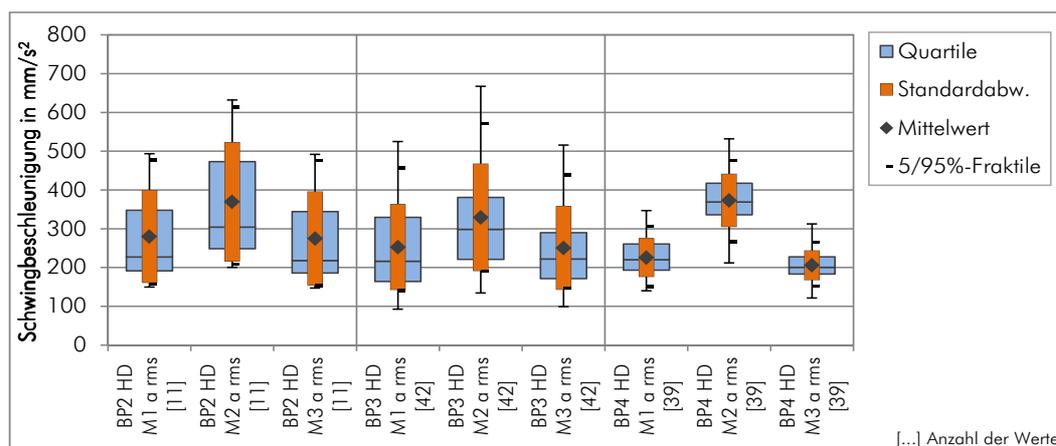


Abb. 7.4 Effektivwert der Schwingbeschleunigung bei heel-drop für M1 bis M3 in BP2, BP3 und BP4

### 1. 2. 2 Eigenfrequenzen

Je nachdem, um welche Eigenform es sich handelt, die aus der Messung bestimmt wurde, können je nach Position der Messpunkte unterschiedlich starke Intensitäten im Frequenzspektrum auftreten. Bei den ausgewerteten Frequenzen bis ca. 25 Hz handelt es sich ausschließlich um Biegefrequenzen der ersten Eigenform in Plattenlängsrichtung und deren Kombination mit Biegefrequenzen der ersten und höheren Eigenformen in Plattenquerrichtung. Dies ist unter anderem daran erkennbar, dass die Intensität im Frequenzspektrum von M1 und M3 (Viertelpunkte) gegenüber M2 (Mitte) verhältnismäßig geringer ausfiel (vgl. Frequenzspektren in *Anhang D - Ergebnisse der Messungen*). Unterschiede in den Werten der ausgewerteten Eigenfrequenzen zwischen den drei Messpunkten konnten dabei keine beobachtet werden bzw. waren vernachlässigbar gering, weshalb die Daten sämtlicher Messpunkte (M1, M2, M3) in den gemittelten Ergebnissen enthalten sind.

### 1. 2. 3 Dämpfungen

Vergleicht man bei den Dämpfungsmaßen der Rohbauphasen die Werte von M1 mit M2 bzw. M3 mit M2, so ist bei der effektiven Dämpfung keine Regelmäßigkeit in den Abweichungen erkennbar. Bei den modalen Dämpfungen der ersten Eigenfrequenz hingegen lassen sich Tendenzen dahingehend erkennen, dass die Dämpfung in M2 geringfügig höher ist als in M1 oder M3. Bezogen auf M2 ergibt sich so ein mittlerer relativer Unterschied von 3,6 % im Mittelwert und 1,8 % im Median.

Dem Verfasser sind keine Arbeiten bekannt, bei denen abhängig von der Lage des gemessenen Punktes, auf einer kontinuierlichen Platte ohne strukturelle Abweichungen, unterschiedliche Dämpfungen festgestellt bzw. näher darauf eingegangen wurde. Vielmehr wurden in anderen Untersuchungen die Werte der Dämpfung aus sämtlichen, gemessenen Punkten gemittelt, um ein größeres Prüflös zu erlangen (vgl. z.B.: [7], [24]). Da die Aufzeichnung der Messungen der drei Punkte M1, M2 und M3 innerhalb dieser Arbeit pro Einzelmessung zeitgleich erfolgte und somit alle drei Punkte exakt den gleichen Randbedingungen aus Anregung, Frequenzfenster und Auswertungsvorgang unterliegen, können Ungenauigkeiten, wie in Kapitel 6. 2. 4. 1 Einflussgrößen und Genauigkeit beschrieben, für einen relativen Vergleich dieser drei Punkte zueinander vernachlässigt werden. Die mögliche Ursache dafür könnte nach Meinung des Autors mit der auf der Platte befindlichen Versuchsperson zusammenhängen, wurde aber im Rahmen der Arbeit nicht weiter verfolgt.

Im Vergleich in Abb. 7.5 sind die erwähnten mittleren Abweichungen in BP3 klar erkennbar, im Median jedoch kaum. Aufgrund der teilweisen Trennung des Estrichs in BP4 wurden die betroffenen Werte der vom angeregten Estrichfeld entkoppelten Punkte (M1 bei Platte 2, 4 und 6), im Datensatz mit der Anmerkung „bereinigt“, nicht berücksichtigt. Ergänzend wurde M1 auch mit sämtlichen Daten eingefügt.

In der Ausbauphase ist die Dämpfung in M2 nur um 1,0 % im Mittelwert, jedoch um 2,9 % im Median größer als in den Punkten M1 „bereinigt“ (M1 aufgrund des teilweise getrennten Estrichs nur bei Platte 1 und Platte 5 berücksichtigt) und M3. Betrachtet man Abb. 7.5, so lässt sich der Trend, welcher sich in der Rohbauphase abzeichnet, in der Ausbauphase nur mit geringer Zuverlässigkeit bestätigen, zumal M1 „bereinigt“ im Mittel höhere Dämpfungswerte aufweist als M2.

Auffallend in Abb. 7.5 ist, dass die Dämpfungsmaße in der Ausbauphase wesentlich größer sind als in den Rohbauphasen was auf den eingebrachten Fußbodenaufbau im ausgebauten Zustand zurückzuführen ist. Die Ursache der rechtsschiefen Verteilung der Dämpfungswerte von BP3 wird in Abschnitt 2. 1. 3 erläutert.

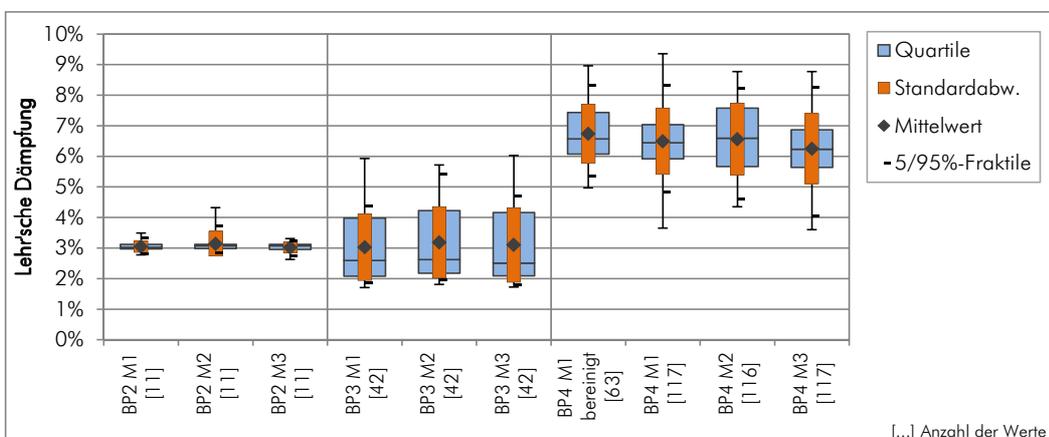


Abb. 7.5 modale Dämpfungsmaße ( $\zeta_1$ ) aufgeschlüsselt in M1 bis M3 für BP2, BP3 und BP4

Aufgrund der geringen relativen mittleren Abweichung von 3,6 % zwischen den Punkten M2 zu M1 bzw. M3 und der kaum vorhandenen Unterschiede in den Medianen von BP3, wird dieses Phänomen bei den weiteren Analysen der Dämpfungsmaße vernachlässigt. Demzufolge werden sämtliche Messwerte aller drei Messpunkte einer Platte gemeinsam betrachtet. Bei nachfolgenden in-situ Messungen und Laboruntersuchungen sollte dieses Phänomen jedoch Berücksichtigung finden, um die Ursachen für diese geringen Abweichungen zu ergründen.

## 2 Einbauabhängige Eigenschaften

Ein wesentlicher Inhalt dieser Arbeit ist die Beobachtung des Schwingungsverhaltens von Decken aus BSP in der Einbausituation. Dabei lassen sich sowohl Einflüsse in Abhängigkeit der Lagerbedingung als auch des Einspannungsgrades, welcher sich aus der unterschiedlichen Auflast der aufgehenden Wände einstellt, festhalten; auf diese wird in diesem Abschnitt näher eingegangen. Einflüsse, die sich aus den unterschiedlichen Fensteröffnungen, den Sturzträgern und in der Ausbauphase aus den Trennwänden und dem schwimmenden Estrich ergeben, konnten im Zuge der Analyse nur vermutet werden, und finden deshalb nur in Randbemerkungen der folgenden Unterabschnitte Erwähnung.

Bei der Betrachtung der Schwingungsgrößen wird generell nur auf die Schwingbeschleunigung eingegangen. Da sich die Schwinggeschwindigkeit von der Schwingbeschleunigung ableitet, wird vorausgesetzt, dass sich beide Schwingungsgrößen in ihrer Intensität proportional gleich verhalten. In Abschnitt 1 konnte dieser Zusammenhang für alle Vergleiche bestätigt werden, weshalb dies in diesem Abschnitt nur noch stichprobenartig überprüft wurde.

### 2.1 Einfluss der Lagerbedingungen

Die Anzahl und Nachgiebigkeiten der Auflager einer orthogonal tragfähigen Deckenplatte können die dynamischen Eigenschaften verändern, da diese mit der Systemsteifigkeit und der Lastabtragungsrichtung maßgebliche Randbedingungen von schwingungsfähigen Systemen beeinflussen. Anhand der vier ausgewählten Lagerbedingungen im Wohnbauprojekt `_massive_living` werden im Folgenden diese Einflüsse genauer betrachtet.

#### 2.1.1 Schwingungsgrößen

Betrachtet man Bauphase 3 (fertiger Rohbau) in Abb. 7.6 und Abb. 7.7, so lässt sich erkennen, dass die Schwingbeschleunigung mit der alphabetisch ansteigenden Reihenfolge der Lagerbedingungen zunimmt. Wenngleich sich Lagerbedingung C (zwei Wandaufleger und ein längsseitiger Unterzug als Auflager) aufgrund der geringen Anzahl an Werten und der großen Streuung in dieser Reihenfolge nicht eindeutig zuordnen lässt, so ist doch ein Zusammenhang von Systemsteifigkeit zufolge Auflager-

bedingung und Anregbarkeit der Deckenplatte erkennbar. Dabei ist anzumerken, dass die alphabetische Reihung der Lagerbedingungen nach der Reihenfolge erfolgte in der sie im Grundriss auftreten und folglich keinen direkten Zusammenhang mit den jeweiligen Systemsteifigkeiten der Deckenelemente besitzt. Dass die Deckenelemente der Lagerbedingung C und D gegenüber B gleich bzw. stärker angeregt werden konnten, obwohl diese statisch betrachtet eine höhere Systemsteifigkeit besitzen, ist vermutlich dadurch zu erklären, dass der Unterzug, auf welchem C und D teilweise aufliegen, zufolge dynamischer Anregung, im Gegensatz zum Wandaufleger, mitschwingt. Dieses ähnliche dynamische Verhalten des Unterzugs in Bezug auf die Deckenelemente scheint demzufolge die positiven Effekte der höheren Systemsteifigkeit zu überlagern.

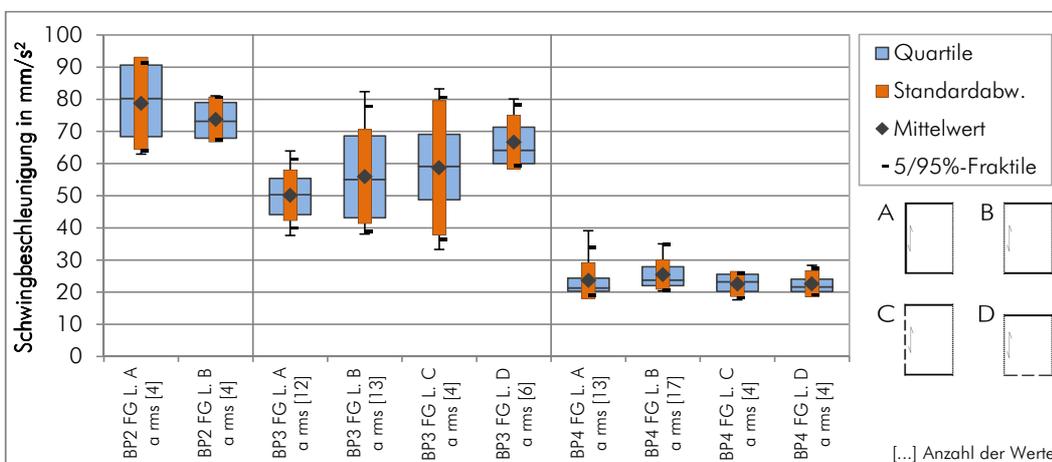


Abb. 7.6 Effektivwert der Schwingbeschleunigung bei freiem Gehen in M2 für die Lagerbedingungen A bis D in BP2 bis BP4

Während sich in der fertigen Rohbauphase relativ gute Zusammenhänge zwischen Lagerbedingung und Systemantwort erkennen lassen, sind für die Bauphase 2 (verschraubte Deckenplatte) aufgrund der großen Streuung von Auflagerbedingung A und der geringen Anzahl der Werte keine Verhaltensmuster ableitbar. Auch in der Ausbauphase lassen sich keine Tendenzen, wie in der fertigen Rohbauphase vorhanden, erkennen. Einzig Lagerbedingung B zeigt eine geringfügig höhere Schwingbeschleunigung. Dies kann aber aufgrund der geringen Anzahl an Messwerten bei Lagerbedingung C und D und der großen Streuungen beim heel-drop nicht genauer eingeordnet werden.

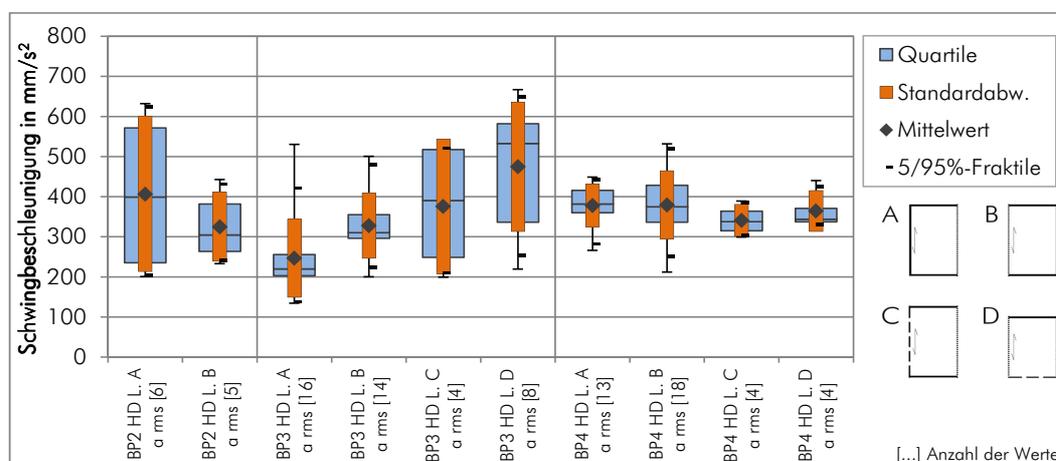


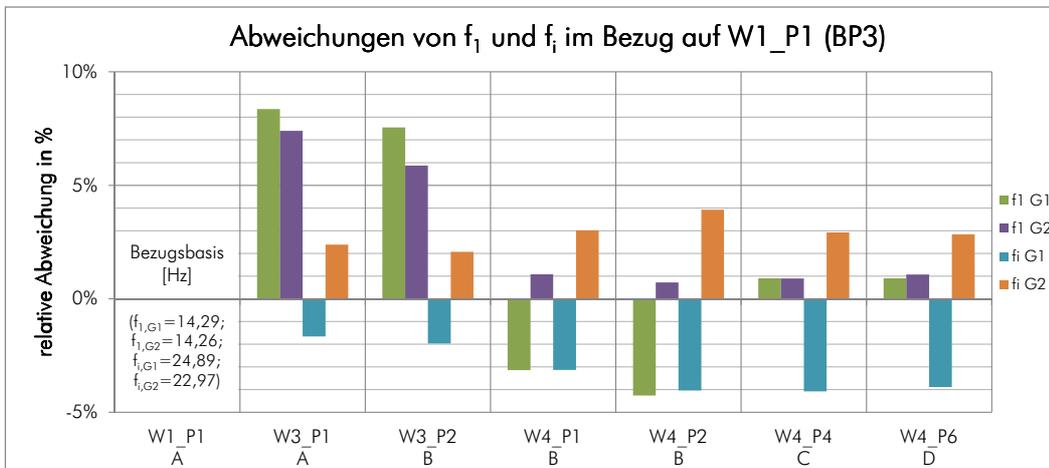
Abb. 7.7 Effektivwert der Schwingbeschleunigung bei heel-drop in M2 für die Lagerbedingungen A bis D in BP2 bis BP4

Unabhängig von den Lagerbedingungen zeichnet sich, analog den Beobachtungen in *Abschnitt 1. 1. 1*, bei der Anregung durch freies Gehen ein Rückgang der Schwingungsantwort mit fortschreitenden Bauphasen ab, was sich hingegen beim heel-drop nicht beobachten lässt. Erkennbar ist auch, dass die Werte in der Ausbauphase bei beiden Anregungsarten geringer streuen als in den Rohbauphasen, was vermutlich den homogenisierenden Eigenschaften des schweren Fußbodenaufbaus geschuldet ist (geändertes Gewichtsverhältnis von anregender Person zu Decke; größere Dämpfungsmaße des schwimmenden Estrichs).

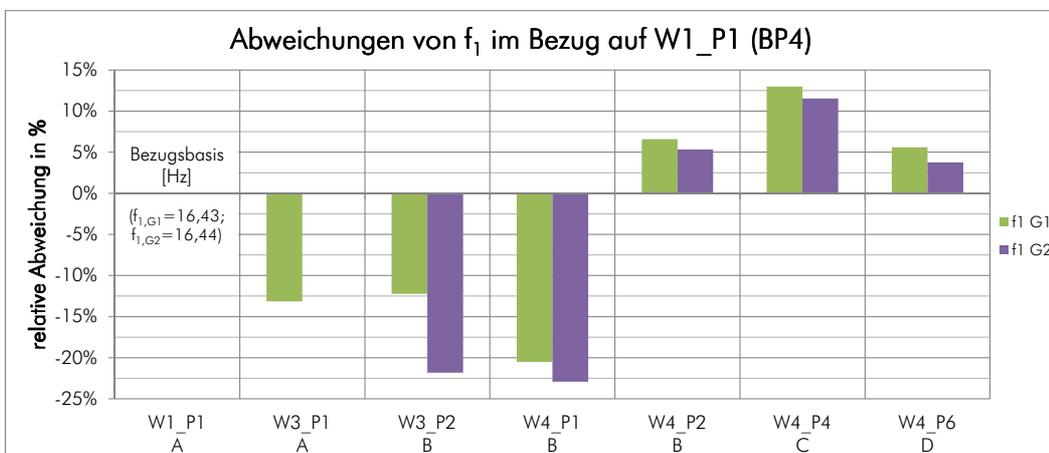
### 2. 1. 2 Eigenfrequenzen

Als Folge der unterschiedlichen Systemsteifigkeiten sind in den Eigenfrequenzen Unterschiede feststellbar. Eine geringere Steifigkeit der Decke führt prinzipiell zu geringeren Eigenfrequenzen. Da jedoch die Eigenfrequenzen zum Teil sehr nahe beieinander liegen und somit die Bestimmung über das Frequenzspektrum zum Teil nicht möglich ist, konnten nur die erste und letzte ausgewertete Eigenfrequenz in der Rohbauphase und nur die erste Eigenfrequenz in der Ausbauphase durchgehend unter den verschiedenen Lagerungsarten verglichen werden.

In Abb. 7.8 und Abb. 7.9 sind die relativen Abweichungen der Platten mit Bezug auf die Platte 1 in Wohnung 1 dargestellt (entspricht Lagerbedingung A). Die Frequenzen des ersten und zweiten Obergeschosses (G1, G2) werden getrennt angeführt und verglichen um die Ergebnisdaten nicht hinsichtlich eventuell vorhandener Einspannungseffekte (siehe *Abschnitt 2. 2*) zu verfälschen. Die Werte von Platte 5 in Wohnung 1 und folglich die Bauphase 2 konnten in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt werden, da sie für den Verfasser keine erklärable Beziehungen zu den übrigen Werten besitzen (vgl. *Anhang D - Ergebnisse der Messungen*).


 Abb. 7.8 relative Abweichungen der Eigenfrequenzen  $f_1$  und  $f_i$  von W1\_P1 (Bezugsbasis) in BP3

Beim Vergleich der Abweichungen in der Bauphase 3 lassen sich keine grundlegenden Abhängigkeiten von der Frequenz zu den Lagerbedingungen erkennen. Einzig der Vergleich der zwei aufeinanderfolgenden Platten P1 und P2, jeweils innerhalb von Wohnung 3 und 4, lässt auf einen Rückgang der Eigenfrequenz bei nachgiebigeren Lagerbedingungen schließen.


 Abb. 7.9 relative Abweichungen der Eigenfrequenz  $f_1$  von W1\_P1 (Bezugsbasis) in BP4

Die Abweichungen der Eigenfrequenzen in der Ausbauphase (BP4) lassen auf keine auflagerbedingte Abhängigkeiten schließen. Bei den Eigenfrequenzen der Ausbauphase ist weiters zu beachten, dass diese stark voneinander abweichen, was auch Ursache von Überlagerungen nahe beieinander liegender Eigenfrequenzen im Frequenzspektrum sein kann. Diese Überlagerungen können dazu führen, dass die erste feststellbare Eigenfrequenz der jeweiligen Platten nicht alle dieselbe Eigenform besitzen und somit der geführte Vergleich nicht durchgängig anwendbar ist.

Lagerbedingung	Platte	Geschoß	Bauphase 3 (BP3)						Bauphase 4 (BP4)		
			f <sub>1</sub> [Hz]			f <sub>1</sub> [Hz]			f <sub>1</sub> [Hz]		
			Einzelplatte	relative Abweichung		Einzelplatte	relative Abweichung		Einzelplatte	relative Abweichung	
				G1	G2		G1	G2		G1	G2
A	W1_P1	G1	14,29	Bezug	Bezug	24,89	Bezug	Bezug	16,43	Bezug	Bezug
		G2	14,26			22,97			16,44		
	W3_P1	G1	15,49	8,4%	24,47	-1,7%	14,27	-13,1%			
		G2	15,32	7,4%	23,52	2,4%	-	-			
B	W1_P5	G1	-	-	-	-	-	12,18	-25,9%	-	
		G2	15,37	7,5%	24,40	-2,0%	14,42	-12,2%			
	W3_P2	G1	15,10	5,9%	23,45	2,1%	12,85	-21,8%			
		G2	13,84	-3,1%	24,11	-3,1%	13,06	-20,5%			
	W4_P1	G1	14,42	1,1%	23,67	3,0%	12,68	-22,9%			
		G2	13,68	-4,3%	23,88	-4,0%	17,51	6,6%			
W4_P2	G1	14,37	0,7%	23,88	3,9%	17,32	5,3%				
	G2	14,42	0,9%	23,87	-4,1%	18,56	13,0%				
C	W4_P4	G1	14,42	0,9%	23,65	2,9%	18,34	11,5%			
		G2	14,42	0,9%	23,92	-3,9%	17,35	5,6%			
D	W4_P6	G1	14,42	1,1%	23,63	2,8%	17,06	3,8%			
		G2	14,42	1,1%	23,63	2,8%	17,06	3,8%			

Tab. 7.1 relative Abweichungen der Eigenfrequenz in BP3 und BP4

### 2. 1. 3 Dämpfungen

Bei der modalen Dämpfung lässt sich, ähnlich wie bei den Schwingungsgrößen in der fertigen Rohbauphase (BP3), ein Anstieg der Dämpfung bei aufsteigender Reihenfolge der Lagerbedingungen feststellen. Demnach führt vermutlich eine dynamisch „weichere“ Lagerung auf dem Unterzug in Verbindung mit erhöhter Bewegungsfreiheit (keine Auflast durch Wände im Bereich Deckenplatte/Unterzug) zu vermehrten Reibungseffekten in den Kontaktflächen, was wiederum die Energiedissipation und somit die Dämpfung begünstigt.

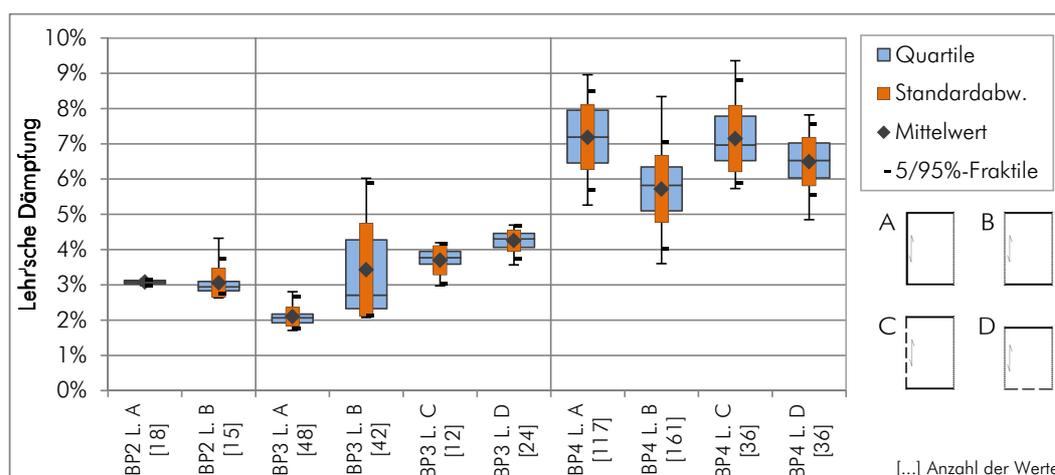


Abb. 7.10 modale Dämpfungsmaße ( $\zeta_1$ ) für die Lagerbedingungen A bis D in BP2 bis BP4

In Bauphase 2 (verschraubte Deckenplatte) lässt ein minimaler Rückgang der mittleren, modalen Dämpfung ebenfalls auf lagerungsabhängige Dämpfungseffekte schließen,

während in Bauphase 4 solche Zusammenhänge nicht erkennbar sind. Auffallend ist, dass die Dämpfung der verschraubten Deckenplatte ohne aufgehende Wände (BP2) in etwa der Lagerbedingung B im fertigen Rohbau entspricht. Die steife, dreiseitige Lagerung auf den Wänden (Lagerbedingung A) in der fertigen Rohbauphase (BP3) scheint dagegen das Dissipationspotential zu verringern; das führt gegenüber der frei aufliegenden, verschraubten Platte zu geringeren Dämpfungsmaßen.

Wie in *Abschnitt 1. 2. 3* angeführt, weisen die Dämpfungswerte des fertigen Rohbaus in *Abb. 7.5* eine rechtsschiefe Verteilung auf. Für die Betrachtung in der erwähnten Abbildung wurden sämtliche vorhandenen Dämpfungsmaße herangezogen und nach der Messposition aufgeschlüsselt (M1, M2, M3). In *Abb. 7.10* ist jedoch ersichtlich, dass sich, je nach Lagerbedingung, unterschiedliche Dämpfungen einstellen, wobei die zwei Lagerbedingungen mit den geringsten Dämpfungswerten eine größere Anzahl an vorhandenen Werten besitzen, was Ursache der erwähnten rechtsschiefen Verteilung ist.

In *Abb. 7.10* weisen die Werte der Lagerbedingung B in der fertigen Rohbauphase neben der rechtsschiefen Verteilung zudem eine erhöhte Streuung gegenüber den anderen Lagerbedingungen auf; die Ursachen dafür werden in *Abschnitt 2. 2. 3* näher betrachtet.

## 2. 2 Einfluss der Einspannungswirkung

Eine stärkere Einspannung im Auflager der Deckenelemente führt zu einer größeren Steifigkeit des Systems. Im Wohnobjekt `_massive_living` ergeben sich durch die unterschiedlichen Auflasten der aufgehenden Wände geschossabhängig unterschiedliche Einspannungseffekte der Deckenplatte. Im Folgenden werden die Ergebnisse geschossweise verglichen, um festzustellen, ob und in welchem Ausmaß eine unterschiedliche Randeinspannung auf die Schwingungseigenschaften Einfluss nimmt.

### 2. 2. 1 Schwingungsgrößen

Der geschossweise Vergleich des Effektivwertes der Schwingbeschleunigung zeigt bei beiden Anregungsarten (freies Gehen und heel-drop) Tendenzen dahingehend, dass die durch geringere Einspannwirkung geprägte obere Geschossdecke stärker angeregt wird (siehe *Abb. 7.11* und *Abb. 7.12*). Dass sich dieser Effekt, anders als bei den Lagerbedingungen, auch in der Ausbauphase bei der Anregung durch den heel-drop noch abbildet, ist vermutlich der direkten Vergleichbarkeit geschuldet, welche sich aus den nahezu identen Grundrissen des ersten und zweiten Obergeschosses ergibt.

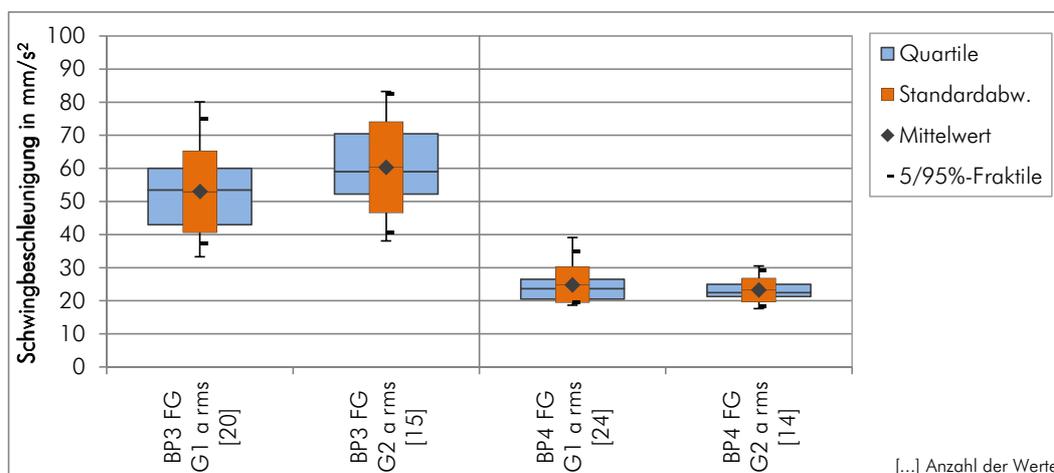


Abb. 7.11 Effektivwert der Schwingbeschleunigung bei freiem Gehen in M2 für das erste und zweite Obergeschoss in BP3 und BP4

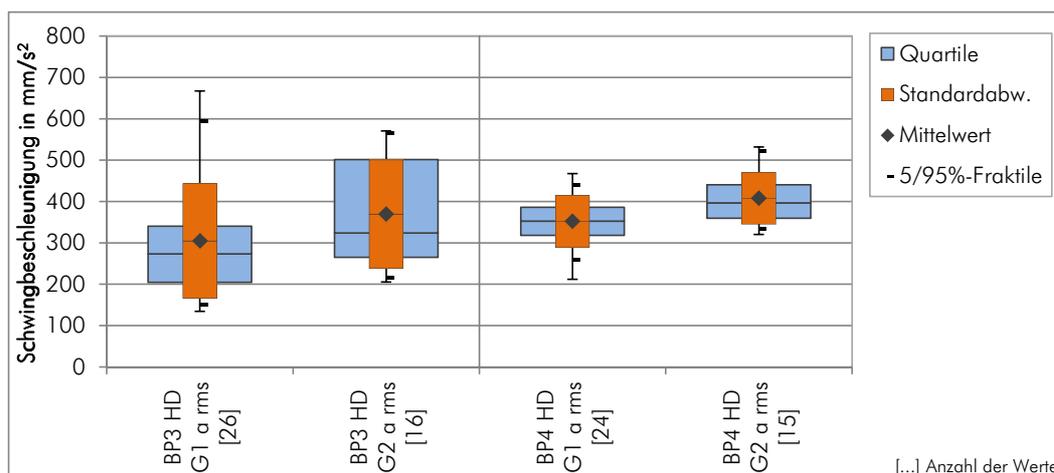


Abb. 7.12 Effektivwert der Schwingbeschleunigung bei heel-drop in M2 für das erste und zweite Obergeschoss in BP3 und BP4

### 2. 2. 2 Eigenfrequenzen

Bei den jeweilig ausgewerteten Eigenfrequenzen konnte nur die erste und die letzte Frequenz anhand der Frequenzspektren bei allen Platten durchgehend der gleichen Eigenform zugeordnet werden ( $f_1$  und  $f_6$  in Abb. 7.13). Die zwischenliegenden Frequenzen  $f_2$  bis  $f_5$  in Abb. 7.13, sofern vorhanden, konnten nur bei Platten derselben Lage im Grundriss gleichen Eigenformen zugeordnet werden. Für den plattenweisen Vergleich im Diagramm erfolgte die Zuweisung der Frequenzen  $f_2$  bis  $f_5$  größenabhängig, mit Gruppierungen von annähernd gleichen Beträgen (siehe Tab. 7.2).

Platte	Geschoss	Bauphase 3 (BP3)						Bauphase 4 (BP4)	
		f <sub>1</sub> [Hz]	f <sub>2</sub> [Hz]	f <sub>3</sub> [Hz]	f <sub>4</sub> [Hz]	f <sub>5</sub> [Hz]	f <sub>6</sub> [Hz]	f <sub>1</sub> [Hz]	f <sub>1</sub> [Hz]
W1_P1	G1	14,29	-	-	18,32	20,92	24,89	16,43	18,28
	G2	14,26	-	-	17,94	20,21	22,97	16,44	18,36
W3_P1	G1	15,49	-	-	-	19,62	24,47	14,27	20,48
	G2	15,32	-	-	-	19,55	23,52	-	20,81
W3_P2	G1	15,37	16,11	17,11	-	19,38	24,40	14,42	20,50
	G2	15,10	16,13	17,09	-	19,49	23,45	12,85	20,85
W4_P1	G1	13,84	16,84	17,41	18,41	20,24	24,11	13,06	-
	G2	14,42	16,90	17,40	18,40	19,97	23,67	12,68	-
W4_P2	G1	13,68	-	17,44	18,44	20,26	23,88	17,51	23,19
	G2	14,37	-	16,88	18,38	19,97	23,88	17,32	24,05
W4_P4	G1	14,42	16,48	-	-	20,11	23,87	18,56	22,40
	G2	14,39	16,88	-	-	19,90	23,65	18,34	22,23
W4_P6	G1	14,42	-	19,24	19,88	21,06	23,92	17,35	19,44
	G2	14,42	-	18,58	19,44	21,14	23,63	17,06	18,83

Tab. 7.2 Zuordnung der Frequenzen für die geschossweisen Vergleiche

Geht man davon aus, dass eine geringere Gesamtsteifigkeit des Systems zu geringeren Eigenfrequenzen führt, so müssten bei einem geschossweisen Vergleich die Eigenfrequenzen im zweiten Obergeschoss geringer sein als im ersten. Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Abweichungen für jede einzelne Platte in Abb. 7.13, so erkennt man, dass nur die Platten 1 und 4 eine der Annahme konträre Tendenz in  $f_1$  aufweisen und die restlichen Eigenfrequenzen, bis auf vereinzelte Ausnahmen, im zweiten Obergeschoss durchgehend geringer sind als im ersten Obergeschoss.

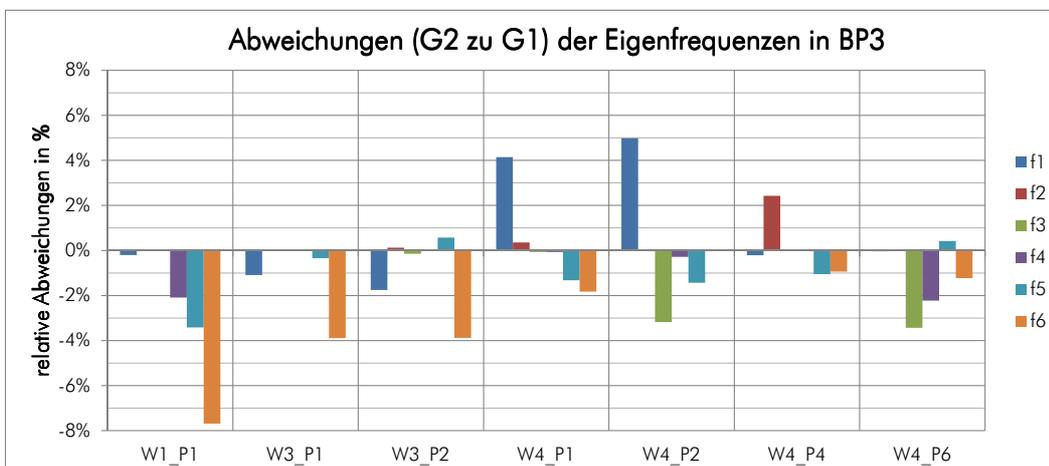


Abb. 7.13 relative Abweichungen der Eigenfrequenzen im 2.OG zu den Eigenfrequenzen im 1.OG (Basis) in BP3

Was die Abweichungen von P1 und P2 in Wohnung 4 betrifft, so ist dies im Zusammenhang mit den Frequenzspektren im ersten Obergeschoss zu sehen, welche, wie im Beispiel von Abb. 7.14 ersichtlich, bei der ersten Eigenfrequenz eine Doppelspitze aufweisen. Die zweite Spitze mit der höheren Frequenz ist in der Intensität durchgehend geringer als die erste bzw. nicht ersichtlich, weshalb sie in der Auswertung vernachlässigt wurde. Erachtet man für den Vergleich in Abb. 7.13 die Frequenz dieser zweiten Spitze

als erste Eigenfrequenz, so verringert sich die Differenz zur Eigenfrequenz des zweiten Obergeschosses auf nahezu null.

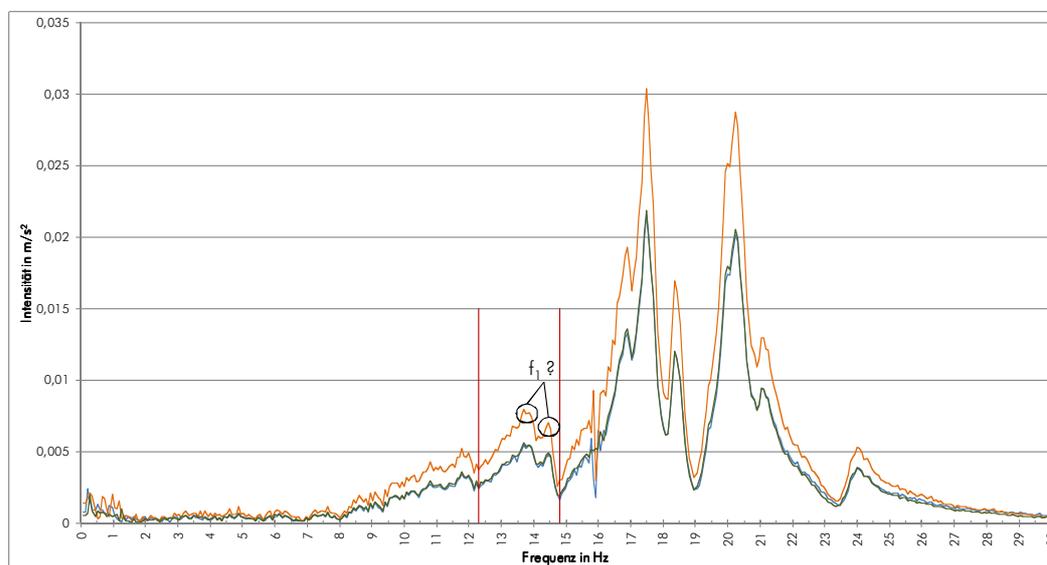


Abb. 7.14 „Doppelspitze“ der ersten Eigenfrequenz im Frequenzspektrum der Messung BR1\_BP3\_G1\_W4\_P1\_HD3\_01

In der Ausbauphase (siehe Abb. 7.15) lassen sich für die erste Eigenfrequenz der jeweiligen Platte im zweiten Obergeschoss, mit Ausnahme von Platte 1 in Wohnung 1 und Wohnung 2, durchgehend niedrigere Frequenzen als im ersten Obergeschoss feststellen, was dem erwarteten Verhalten entspricht. Bei den Frequenzen  $f_i$ , welche sich je nach Platte zwischen 18 und 25 Hz bewegen, lässt sich weder eine Abhängigkeit von der Einspannung feststellen, noch zeigen sich andere Regelmäßigkeiten.

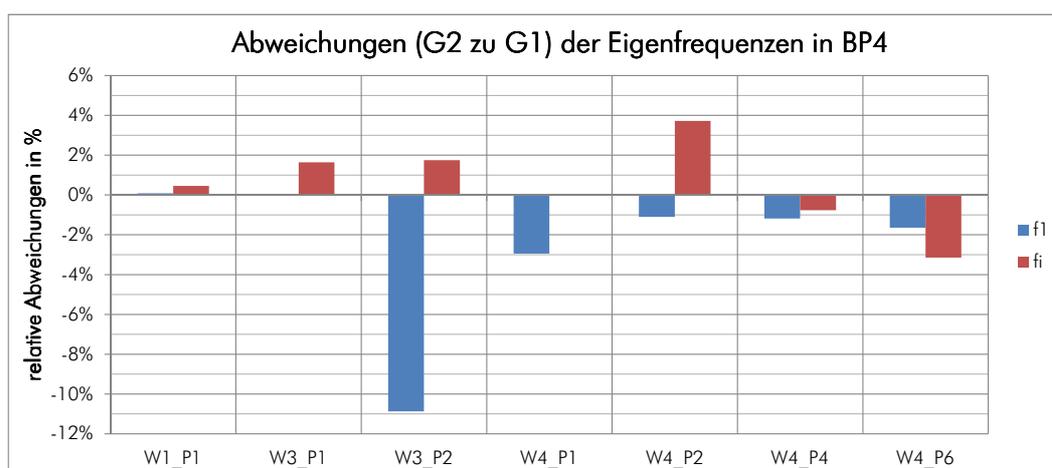


Abb. 7.15 relative Abweichungen der Eigenfrequenzen im 2.OG zu den Eigenfrequenzen im 1.OG (Bezugsbasis) in BP4

## 2. 2. 3 Dämpfungen

Was die Dämpfungen anbelangt, so scheint die geringere Einspannwirkung im zweiten Obergeschoss zu einem weicherem Gesamtsystem mit erhöhtem Dissipationspotential zu führen, was sich anhand der Lagerbedingungen A und C im geringen Ausmaß in Abb. 7.16 zeigen lässt. Lagerbedingung D ist von der Einspannwirkung nur minimal betroffen, insofern dieses Deckenelement nur auf einer Seite und nicht durchgehend auf Wandscheiben aufliegt.

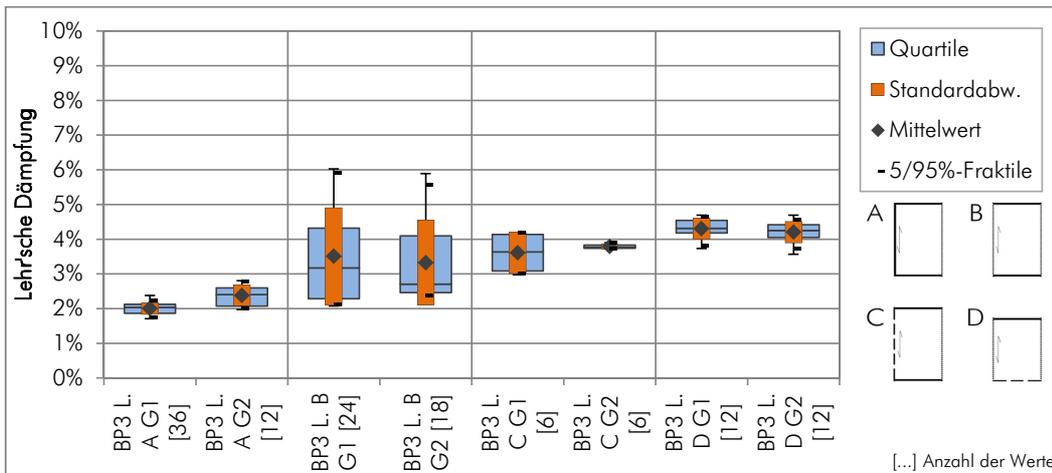


Abb. 7.16 modale Dämpfungsmaße ( $\zeta_1$ ) geschossweise aufgeschlüsselt für die Lagerbedingungen A bis D in BP3

Bei den Werten zur Lagerbedingung B lässt sich der oben beschriebene Trend nicht erkennen. Hinzu kommt, dass die Werte auch einer größeren Streuung unterliegen als die anderen Lagerbedingungen, weshalb für eine genauere Betrachtung in Abb. 7.17 die Ergebnisse für die einzelnen Platten der Lagerbedingung B dargestellt sind.

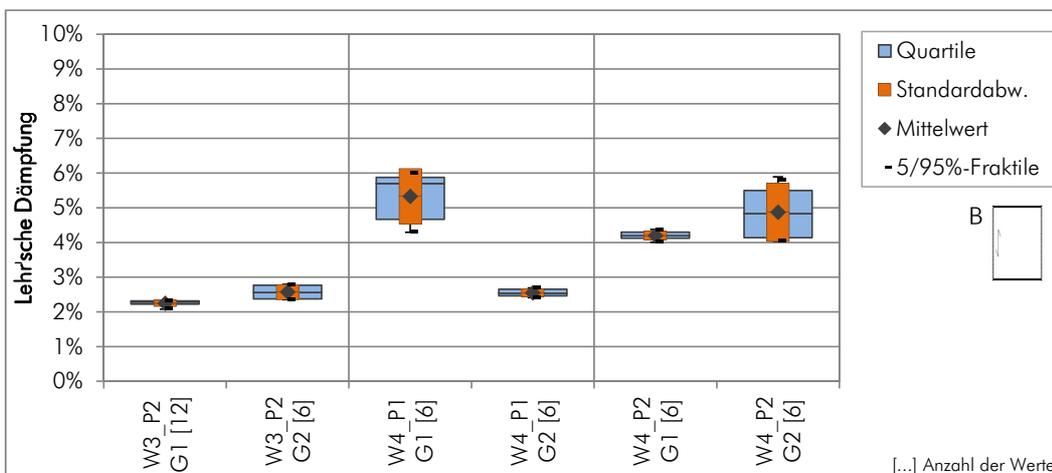


Abb. 7.17 modale Dämpfungsmaße ( $\zeta_1$ ) der Platten von Lagerbedingung B geschossweise aufgeschlüsselt in BP3

Lässt man bei den Ergebnissen in Abb. 7.17 die Platte 1 aus Wohnung 4 außer Acht, so bestätigt sich der Trend von höheren Dämpfungswerten im oberen Geschoss für die Lagerbedingung B ebenfalls. Die Streuungen der einzeln betrachteten Platten fällt zudem gleich gering aus, wie schon bei den anderen Lagerbedingungen in Abb. 7.16.

Die großen Abweichungen im ersten Obergeschoss (G1) von Platte 1 in Wohnung 4 zu den übrigen Dämpfungsmaßen ergeben sich aus Schwebungen (siehe Kapitel 6. 3 Schwebungen), welche bei der betroffenen Platte im bandbegrenzten Signal verstärkt vorhanden sind, welche zu einer Fehleinschätzung der Dämpfung führen (Frequenzspektrum und Bandpassgrenzen in Abb. 7.14 ersichtlich). Vergleichsweise liegt die effektive Dämpfung für die genannte Platte in G1 im Mittel bei 2,52 % und entspricht dem Trend der anderen Ergebnisse in Abb. 7.17, weshalb angenommen werden kann, dass sich die tatsächlich vorhandene modale Dämpfung im Bereich um 2,52 % bewegt. Dieses Beispiel zeigt auf, dass Schwebungen im Hinblick auf die angewendete Auswertungsmethode fallweise zu erheblichen Fehleinschätzungen der Dämpfung führen können.

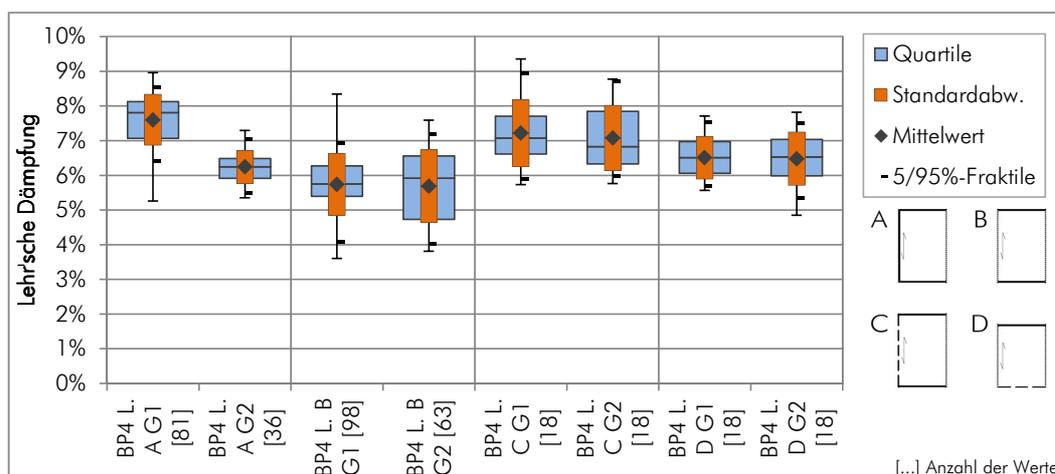


Abb. 7.18 modale Dämpfungsmaße ( $\zeta_1$ ) geschossweise aufgeschlüsselt für die Lagerbedingungen A bis D in BP4

In den Dämpfungsmaßen des ausgebauten Zustands lassen sich keine geschossabhängigen Unterschiede erkennen. Vermutlich bestimmen überwiegend der Bodenaufbau und die Einbauten das Dämpfungsverhalten, weshalb eventuell vorhandene Einspannungseinflüsse in diesem Vergleich nicht erkenntlich sind.

## 3 Zusammenfassung der Analyse

Die diskutierten Zusammenhänge aus Abschnitt 1 und Abschnitt 2 lassen sich auf die folgenden wesentlichen Erkenntnisse zusammenfassen.

### 3.1 Schwingungsgrößen

Anhand der Schwingungsgrößen konnten im Zuge der verschiedenen Untersuchungen in diesem Kapitel durchgehend relevante Reaktionen des schwingungsfähigen Systems aufgezeigt werden. So lässt sich grundsätzlich die Aussage treffen, dass eine höhere Gesamtsteifigkeit des Systems Decke / Auflager zu geringeren Amplituden der Schwingungsantwort führt. In den Rohbauphasen sind, sowohl bei den Lagerungsbedingungen als auch bei den alternierenden Einspannungsgraden im Auflager, entsprechende Tendenzen feststellbar. In der Ausbauphase konnten nur noch Einflüsse des Einspannungsgrades in den Messergebnissen festgestellt werden, wobei durch den Bodenaufbau und dessen zusätzliche Masse, die Anregung beim freien Gehen grundsätzlich geringer ausfällt als in den Rohbauphasen.

Für die Vergleiche und Untersuchungen der Schwingungsgrößen wurde vornehmlich der Effektivwert der Beschleunigung ( $a_{r.m.s.}$ ) verwendet. Auf die Darstellung der übrigen ausgewerteten Schwingungsgrößen wurde verzichtet, da diese für die dargestellten Analysen keinen weiteren Erkenntnisgewinn bedeuteten hätten. Die Wahl des Effektivwertes begründet sich darin, dass dieser nach ÖNORM ISO 2631-2:2007 einen besseren Vergleichswert für Schwingungsgrößen darstellt und zudem die großen Streuungen, wie sie bei einem Vergleich von Scheitelwerten zufolge transienter Signale auftreten können, minimiert.

Sämtliche ausgewertete Ergebnisse zu den Schwingungsgrößen sind *Anhang D - Ergebnisse der Messungen* zu entnehmen.

### 3.2 Eigenfrequenzen

Waren die Eigenfrequenzen innerhalb einer jeweiligen Platte, abgesehen von Überlagerungen nahe beieinander liegender Eigenfrequenzen, mit vernachlässigbaren Abweichungen zwischen den Versuchspersonen und nahezu keinen Unterschieden im Bezug auf die Messposition zu bestimmen, so zeigte sich der Vergleich von Frequenzen unterschiedlicher Platten als durchaus schwierig.

In Bezug auf den Einfluss der Lagerbedingungen auf die Frequenzen konnten keine Aussagen getroffen werden. Ein tendenzieller Rückgang der Eigenfrequenzen konnte bei einem geschossweisen Vergleich im zweiten Obergeschoss (oberes Geschoss) verzeichnet werden, was mit einer geringeren Einspannwirkung im Auflagerbereich und einer daraus resultierenden, geringeren Systemsteifigkeit zu erklären ist. In der Ausbauphase konnte ein diesbezügliches Verhalten nur bei der ersten Eigenfrequenz nachgewiesen werden.

### 3. 2. 1 Vergleich mit Handrechnung

Auf die vorhandenen Bemessungswerkzeuge, welche für die Berechnung der Eigenfrequenzen von Balken und Platten vorhanden sind, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen bzw. deren Genauigkeit in Bezug auf Messdaten nicht näher überprüft werden. Für den Vergleich mit berechneten Eigenfrequenzen in Tab. 7.3 wurden Gl. [7.1] bis Gl. [7.3] dem BSP-Handbuch [22] entnommen. Die erforderlichen Biegesteifigkeiten wurden nach dem n-Ziffern Verfahren bestimmt, deren Berechnung in *Anhang E - Berechnung der Biegesteifigkeit* ersichtlich ist. In der Ausbauphase wurde die Biegesteifigkeit des Estrichs berücksichtigt, der Schubverbund mit der Deckenplatte jedoch als nicht vorhanden angenommen. Die Masse wurde mit dem Eigengewicht der Decke, inklusive Bodenaufbau in der Ausbauphase, angesetzt. Das Gewicht der Versuchsperson wurde dabei vernachlässigt.

$$f_{1, \text{Balken}} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EJ)_L}{m}} \quad [7.1]$$

$$f_{1, \text{Platte}} = f_{1, \text{Balken}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\alpha^4}} \quad [7.2]$$

mit

$$\alpha = \frac{b}{L} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EJ)_L}{(EJ)_Q}} \quad [7.3]$$

- b ... Spannweite in Querrichtung oder Deckenbreite [m]
- L ... Spannweite in Hauptrichtung der Platte [m]
- m ... Masse der Konstruktion [kg/m<sup>2</sup>]
- (EJ)<sub>L</sub> ... effektive Biegesteifigkeit in Längsrichtung [Nm<sup>2</sup>/m]
- (EJ)<sub>Q</sub> ... effektive Biegesteifigkeit in Querrichtung mit (EJ)<sub>L</sub> > (EJ)<sub>Q</sub> [Nm<sup>2</sup>/m]

Die Formelwerke des BSP-Handbuches decken sich mit denen, welche in der ÖNORM B 1995-1-1:2010 für die Berechnung der ersten Eigenfrequenz von vierseitig gelenkig gelagerten Decken mit zweiachsiger Tragwirkung angegeben werden. Für die einzusetzende Masse der Decke setzt die ÖNORM die quasi-ständige Lastfallkombination voraus, was zu noch geringeren ersten Eigenfrequenzen führt (siehe Tab. 7.3).

Bauphase	Erste Eigenfrequenz [Hz]						
	W1_P1	W3_P1	W3_P2	W4_P1	W4_P2	W4_P4	W4_P6
Messung Bauphase 2	14,5						
Messung Bauphase 3	14,3	15,4	15,2	14,1	14,0	14,4	14,4
Rechnung mit Eigengewicht	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	20,9
Messung Bauphase 4	16,4	14,3	13,6	12,9	17,4	18,5	17,2
Rechnung mit Eigengewicht	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	11,5
Rechnung mit quasi-ständiger LFK	7,5	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6	10,6

Tab. 7.3 erste ausgewertete und berechnete Eigenfrequenz sortiert nach Bauphasen

Die Berechnungen der ersten Eigenfrequenz nach Gl. [7.2] entsprechen in der Rohbauphase annähernd den gemessenen Werten, was auf eine gute Annäherung dieses Formelapparates schließen lässt. Die berechnete Eigenfrequenz für Platte 6 in Wohnung 4 bildet dahingehend eine Ausnahme, da sie nicht der ausgewerteten Frequenz  $f_1$  sondern der Frequenz  $f_4$ , welche sich zu 21,1 Hz bestimmen lässt, entspricht. Die Frequenz  $f_4$  weist zwar im Spektrum zum Teil die höchste Intensität auf, jedoch lassen sich im Frequenzspektrum noch niedrigere „Peaks“ mit den Frequenzen  $f_1 = 14,4$  Hz,  $f_2 = 18,91$  Hz und  $f_3 = 19,66$  Hz bestimmen (vgl. Frequenzspektren in *Anhang D - Ergebnisse der Messungen*). Da die Platte 6 mit einer Spannweite von 4,42 m um 0,76 m kürzer ist als die restlichen Platten und die Berechnung der ersten Eigenfrequenz bei den anderen Platten in etwa übereinstimmt, ist es plausibel, dass es sich bei  $f_4$  der Platte 6 um die Eigenfrequenz der ersten Eigenform in Plattenlängsrichtung handelt. Diese Diskrepanz bei Platte 6 zeigt auf, dass bei komplexen Einbausituationen die Auswertung der Eigenfrequenzen allein mit Hilfe des Frequenzspektrums nicht ausreichend ist, sofern man die Absicht hat, diese explizit einer Eigenform zuzuordnen.

Betrachtet man die gemessenen ersten Eigenfrequenzen in Tab. 7.3, so ist festzustellen, dass diese in der Ausbauphase teilweise höher sind als die erste Eigenfrequenz in der Rohbauphase, und das, obwohl durch den Ausbau zusätzliche Masse aufgebracht wurde, ohne die Steifigkeit der Deckenplatte maßgeblich zu erhöhen. Dies resultiert aus den Überlagerungen mehrerer nahe beieinander liegender Eigenfrequenzen, welche die vermutlich vorhandene niedrigere erste Eigenfrequenz im Frequenzspektrum an Intensität überlagert und welche als Folge dessen nicht bestimmt werden konnte. Nimmt man anhand der Beispiele von W3\_P1, W3\_P2 und W4\_P1 an, dass die erste Eigenfrequenz zwar mit geringer Intensität, jedoch bei allen Platten vorhanden, im Bereich um ca. 13 bis 14 Hz liegt, so fällt diese um ca. 1,5 Hz geringer aus als die erste Eigenfrequenz der Rohbauphasen. Berücksichtigt man die Änderung des Eigengewichts von 95 auf 346 kg/m<sup>2</sup> (siehe Tab. 5.2 in *Kapitel 5. 2 Ausführungsdetails*), so ist die erste Eigenfrequenz dennoch verhältnismäßig hoch. Aufgrund der höheren Auflast würde sich die Eigenfrequenz zu nur 8,2 Hz bzw. bei quasi-ständiger Lastfallkombination (406 kg/m<sup>2</sup>) zu 7,5 bis 7,6 Hz berechnen lassen. Die Ursachen dieser großen Abweichung vom berechneten Erwartungswert sind der aussteifenden Wirkung der Zwischenwände und Einflüssen des Fußbodenaufbaus zuzuordnen, welche in die Berechnung nicht einfließen. Zum Ergebnis zufolge der quasi-ständigen Lastfallkombination ist anzumerken, dass diese Nutzlasten berücksichtigt, welche zum Zeitpunkt der Messung nicht vorhanden waren.

### 3.3 Dämpfungen

Messpositionsabhängige Unterschiede in den Dämpfungsmaßen wurden bei vergleichbaren Arbeiten nach Wissenstand des Verfassers bislang nicht verzeichnet. Beim Vergleich der Dämpfungen von M2 mit den Werten von M1 und M3 wurden jedoch im Rahmen dieser Arbeit geringfügige Abweichungen festgestellt (relative Abweichung ca. 3,6 %). Aufgrund statistischer Unsicherheiten wurden diese geringen Unterschiede in weiterer Folge vernachlässigt.

Einbaubedingte Einflüsse in Form von Lagerbedingungen und Randeinspannungen konnten bei Vergleichen der Dämpfungsmaße in den Rohbauphasen festgestellt werden, waren jedoch in der Ausbauphase nicht erkennbar. Den Ergebnissen zufolge führt eine lagerungsbedingte, geringere Systemsteifigkeit bzw. erhöhte Bewegungsfreiheit in den Auflagern zu höheren Dämpfungen. Beim geschossweisen Vergleich konnte die gleiche Analogie aus Systemsteifigkeit und Dämpfung angewendet werden, wobei Lagerbedingung D insofern keine diesbezüglichen Differenzen aufweist, da diese Platten nur geringfügige Auflagerflächen in der Außenwand besitzen und somit unwesentlich von der geringen Einspannwirkung beeinflusst werden.

Für die Analyse des Dämpfungsverhaltens in den verschiedenen Vergleichen wurde durchgehend die modale Dämpfung der ersten Eigenfrequenz verwendet. Zum einen, da das effektive Dämpfungsmaß der ungefilterten Ausschwingkurve je nach Platte unterschiedliche multifrequente Überlagerungen beinhaltet und somit in Vergleichen Unterschiede aufzeigt, welche modal betrachtet nicht vorliegen. Zum anderen unterliegt die Bestimmung der effektiven Dämpfung, aufgrund des teilweise irregulären Verlaufs der Ausschwingkurve (siehe Kapitel 6. 2. 4. 1 Einflussgrößen und Genauigkeit), größeren potentiellen Ungenauigkeiten, was die angeführten Vergleiche zusätzlich erschwert hätte.

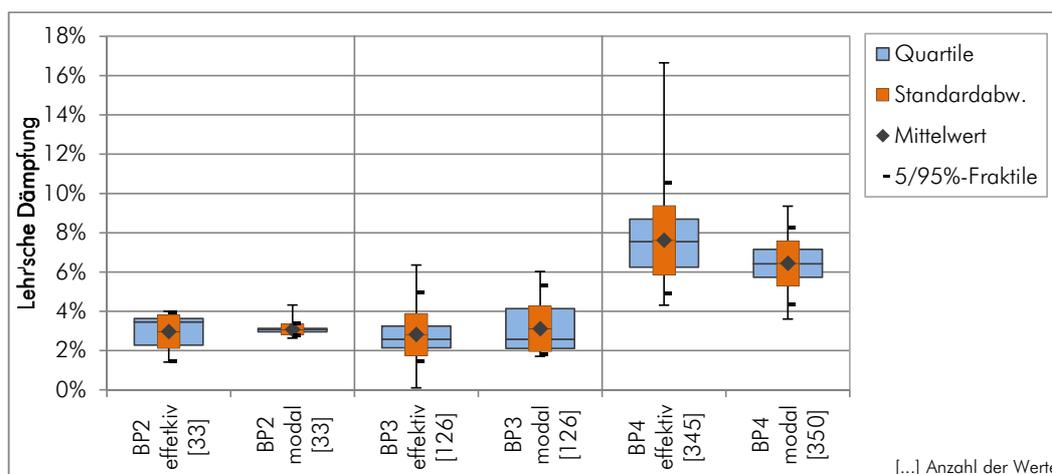


Abb. 7.19 Vergleich von effektiver ( $\zeta_{\text{eff}}$ ) und modaler ( $\zeta_1$ ) Dämpfung in den verschiedenen Bauphasen

Die relevanten numerischen Ergebnisse aus Abb. 7.19 sind in Tab. 7.4 wiedergegeben.

Lehr'sches Dämpfungsmaß [-]						
Bauphase	Mittelwert		Median		5%-Fraktile	
	effektiv	modal	effektiv	effektiv	effektiv	modal
BP2	3,0%	3,1%	3,5%	3,1%	1,5%	2,8%
BP3	2,8%	3,1%	2,6%	2,6%	1,4%	1,8%
BP4	7,6%	6,4%	7,5%	6,4%	4,9%	4,4%

Tab. 7.4 Gesamtergebnisse der Dämpfungen sortiert nach Bauphasen

Nach Meinung des Verfassers stellt sich die Frage, ob die geringfügig höheren Dämpfungswerte, wie sie bei den Vergleichen der Lagerbedingung und der geschossabhängigen Einspannwirkung bei den jeweils „weicheren“ Systemen auftreten, mit der Anregbarkeit in den Schwingungsgrößen korreliert, da diese ein den Dämpfungen ähnliches Verhalten aufweisen. Erklärbar durch den höheren Reibungsanteil bei größeren Schwingungsamplituden könnten so durch weitere Untersuchungen, sofern sich diese Annahme bestätigen sollte, Verhältniszahlen erarbeitet werden, welche von der durch beispielsweise in FEM-Simulationen errechneten Schwingbeschleunigung auf die Dämpfung rückrechnen lassen (ev. in Form eines Iterationsprozesses).

## Zusammenfassung

Wie in der Einführung erwähnt, ist die Wahrnehmung von Schwingungen quantitativ schwer erfassbar, was sich in den verschiedensten Ansätzen von möglichen Grenzwerten widerspiegelt. Zum einen ist die Wahrnehmung und im Weiteren die Grenze der Unannehmlichkeit von Schwingungen stark vom subjektiven Empfinden und der körperlichen Verfassung der Personen abhängig. Auch regional übliche Bauweisen können die Wahrnehmung von Bevölkerungsgruppen insofern beeinflussen, als dass z.B. „weiche“ Holzdecken erwünscht sind. Zum anderen lassen sich Schwingungen mathematisch durch messtechnisch erfassbare Parameter beschreiben, wobei jeder dieser Parameter unterschiedlich mit der subjektiven Wahrnehmung korreliert, was die Bestimmung von Grenzwerten erschwert.

Ein wichtiger Parameter für die Bewertung des Schwingungsverhalten von Geschossdecken ist die Dämpfung. Nach Meinung des Verfassers kommt zum Umstand, dass die messtechnische Erfassung der Dämpfung grundsätzlich gewissen Ungenauigkeiten unterliegt, noch hinzu, dass normative Regelungen, welche die anzuwendende Methode, die zugehörigen Randbedingungen und deren Anwendungsgrenzen genau festlegen, fehlen. Werden die angewendeten Methoden zudem noch unzureichend dokumentiert, erschwert dies den Vergleich mit Ergebnissen zu Dämpfungsmaßen aus verschiedener Literatur und Forschungsarbeiten noch zusätzlich.

Bei den Messungen dieser Arbeit befand sich für die Anregung durchgehend eine Person auf dem untersuchten Deckenelement. Diese Person nimmt dadurch auf die Schwingungseigenschaften der Decke Einfluss, indem sich die Dämpfung erhöht und die Eigenfrequenzen, je nach Masseverhältnis der Person zur Decke, verringern. In der Wissenschaft gehen die Meinungen auseinander, ob Schwingungsparameter, welche den Einfluss einer Person beeinhaltet, für die Bemessung von Wohnungsdecken herangezogen werden sollen. Tatsächlich befindet sich bei personeninduzierten Schwingungen mit der anregenden Person immer mindestens eine Person auf der Decke, deren Berücksichtigung in der Bemessung als durchaus legitim erscheint. Eine international einheitliche Lösung, welche bezugnehmend auf diesen Sachverhalt Klarheit schafft, sollte angestrebt werden.

Durch die regelmäßigen Grundrisse mit der fast einheitlichen Deckenspannweite von 5,17 m beim Wohnbauprojekt `_massive_living` und der Möglichkeit in verschiedenen Geschossen und Bauphasen Messungen durchzuführen, konnten in der Datenanalyse Einflüsse auf Geschossdecken zufolge der Einbausituation näher betrachtet werden. Dabei zeichnete sich in der Rohbauphase ein Zusammenhang von Lagerbedingung bzw. Einspannungswirkung durch Auflasten im Auflager mit den Schwingungsparametern Schwingbeschleunigung, Dämpfung und teilweise Eigenfrequenzen ab. Generell konnte festgestellt werden, dass eine abnehmende Systemsteifigkeit in Form von „weicheren“ Auflagerbedingungen und geringerer Einspannungswirkung in den Auflagern zu größeren Dämpfungen und einer leichteren Anregbarkeit in der Schwingbeschleunigung führt.



Abb. 8.1 Nivellieren der Messsensoren für die Messungen zu `BR1_BP3_G1_W3_P2`

Waren einbaubedingte Einflüsse wie Lagerbedingung und Einspannungswirkung in der Rohbauphase anhand der bestimmten Schwingungsparameter noch erkennbar, so konnten diese in der Ausbauphase nur selten bestätigt werden. Vielmehr scheinen der Bodenaufbau und die nichttragenden Zwischenwände das dynamische Verhalten zu dominieren. Diese Zusammenhänge sollten in weiteren Forschungsarbeiten noch näher untersucht werden, nicht zuletzt deshalb, da sie in aktuellen Bemessungsformeln nicht berücksichtigt werden. So berechnet sich die erste Eigenfrequenz in der Ausbauphase infolge des Eigengewichtes auf einen um durchschnittlich 44 % geringeren Wert, als tatsächlich gemessen wurde.



Anhang

# 1 Anhang A - Bezeichnungen, Formelzeichen und Begriffe

Im Folgenden sind die wichtigsten, in dieser Arbeit verwendeten, Bezeichnungen und Formelzeichen angeführt.

## 1. 1 Bezeichnungen und Formelzeichen

$a = \ddot{u}$	Schwingbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ; mm/s <sup>2</sup> ]
$c$	Dämpfungskonstante	[-]
$f_0$	Eigenfrequenz des Einmassenschwingers	[Hz]
$f_n$	(Eigen-)Frequenz der n-ten Eigenform	[Hz]
$f_{n,m}$	(Eigen-)Frequenz der n-ten Eigenform in x-Richtung und m-ter Eigenform in y-Richtung	[Hz]
$k$	Federsteifigkeit	[-]
$\Lambda$	logarithmisches Dekrement (auch $\vartheta$ )	[-]
$\Omega$	Anregerfrequenz	[rad/s]
$\omega_0$	Eigenkreisfrequenz	[rad/s]
$\omega_D$	gedämpfte Eigenkreisfrequenz	[rad/s]
$\omega_m$	maximale Frequenz des betrachteten Signals	[rad/s]
$\omega_s$	Frequenz der Abtastfunktion für ein analoges Signal	[rad/s]
$p(t)$	Belastungsfunktion	[N]
$\Theta$	Phasenwinkel (verschiebt Schwingkurve entlang Zeitachse)	[rad]
$t$	Zeitvariable	[s]
$T$	Periodendauer (Dauer einer Schwingung)	[s]
$u$	Schwingweg, Verschiebung	[m; mm]
$u(t)$	Funktion der Verschiebung	[m; mm]
$V$	Vergrößerungsfaktor	[-]
$\dot{v} = \dot{u}$	Schwinggeschwindigkeit	[m/s; mm/s <sup>2</sup> ]

$\zeta$  Lehr'sches Dämpfungsmaß (auch  $D$ ,  $\xi$ ) [-]

$\zeta_n$  modales Lehr'sches Dämpfungsmaß der n-ten Eigenform [-]

### Fußzeiger:

eff effektiv

i Nummer der Amplitude

mod modal

n,m Nummer der Eigenform

r.m.s. Effektivwert (root mean square)

w bewertet (gemäß Bewertungskurve  $W_m$  der ÖNORM ISO 2631-2:2007)

## 1.2 Begriffe

Aliasingeffekt	wird das Abtastungstheorem nicht eingehalten kommt es zu sogenannten Aliasingeffekten. Dies bedeutet, dass bei ungeeigneter Abtastung das diskretisierte Signal eine andere Frequenz aufweist als das gemessene, analoge Signal
Abtastungstheorem	siehe Shannon Theorem
Bandpassfilter	Filterfunktion, welche nur Frequenzanteile eines Zeitsignals aus einen definierten Frequenzbereich durchlässt; entspricht einer Kombination von Hoch- und Tiefpassfilter.
bewertetes Signal	Signal, welches mit der Bewertungskurve der ÖNORM ISO 2631-2:2007 (siehe Kapitel 3. 2 ISO 2631) gewichtet wurde
Dämpfungsmaß	verkürzter Ausdruck für Lehr'sches Dämpfungsmaß
effektive Dämpfung	die effektive Dämpfung wird aus ungefilterten Zeitsignalen der Schwingbeschleunigung gewonnen und beinhaltet in dieser Arbeit die gesamte Systemantwort im Frequenzbereich zwischen 1 und 80 Hz
Effektivwert	Der Effektivwert errechnet sich gemäß Gl. [A.1] und wird als Bewertungsgröße verwendet.
	$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a^2(t) dt} \quad [A.1]$
Fensterfunktion	werden für die Auswahl eines gewichteten Ausschnitts (Fenster) aus einem diskreten Signal verwendet
FFT	die Fast-Fourier-Transformation ist ein Algorithmus für die Berechnung des Frequenzspektrums eines Signals
gewichtetes Signal	entspricht bewertetem Signal
heel-drop	Anregungsform mit transienter Lasteinwirkung bei der sich die Versuchsperson zuerst auf die Zehenspitzen stellt und dann auf die Fersen fallen lässt. (siehe Kapitel 4. 1. 1. 5 heel-drop)
Hochpassfilter	Filterfunktion welche nur Signale über einer definierten Grenzfrequenz berücksichtigt.
Interferenz	Überlagerung zweier Schwingungen

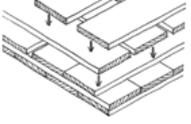
modale Dämpfung	jede Eigenfrequenz / Eigenform (mode) eines Systems besitzt eine jeweils zugehörige „modale“ Dämpfung
Nullpunktfehler	Abweichung des Mittelwertes des Signals von der Nullachse
Nyquistfrequenz	die Nyquistfrequenz ergibt sich aus der halben Abtastfrequenz und dient als Grenzbedingung für das Shannon Theorem
r.m.s.	steht für root mean square und entspricht dem Effektivwert
Shannon Theorem	auch Abtastungstheorem genannt: $\omega_s > 2 \cdot \omega_m$ Die Frequenz der Abtastfunktion $\omega_s$ muss größer sein, als der zweifache Wert der höchsten Frequenz $\omega_m$ des Signals [6]
Scheitelwert	maximale Amplitude einer (transienten) Schwingung
Schwebung	Interferenz zweier Schwingungen, deren Frequenzen sehr nahe beieinander liegen (siehe Kapitel 6. 3 Schwebungen)
Schwingungsgrößen	Überbegriff für Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg.
Schwingungsparameter	Überbegriff für sämtliche Parameter, die benötigt werden um den Verlauf einer Schwingung zu beschreiben (Eigenfrequenz, Dämpfung, Amplitude).
SDOF	Einmassenschwinger (single degree of freedom)
Shaker	technisches Gerät mit dessen Hilfe Konstruktionen in einer definierten Schwingung angeregt werden können.
Tiefpassfilter	Filterfunktion welche nur Signale unter einer definierten Grenzfrequenz berücksichtigt.

## 2 Anhang B - Produktdatenblätter

### 2.1 Brettsperrholz

#### M1 BSP crossplan

#### TECHNISCHE DATEN

<b>Produkt</b>	M1 BSP (Brettsperrholz) crossplan ist eine großformatige Massivholzplatte mit mehrschichtigem, kreuzweise orientiertem Querschnittaufbau.			
<b>Aufbau und Herstellung</b>	 <p>Keilgezinkte und gehobelte Brettlamellen werden lose nebeneinander verlegt und die Lagen rechtwinklig zueinander flächig verleimt.</p> <p>Zur Vermeidung von unkontrollierten Spannungsrissen erfolgt keine Schmalseitenverleimung. Die Lagen werden vor Aufbringen des Pressdrucks (1,2 N / mm<sup>2</sup>) seitlich bündig zusammengeschoben, um eine fugenfreie Oberfläche zu erhalten.</p>			
<b>Abmessungen</b>	<b>Längen</b>	bis 16,50 m	<b>Standardbreiten</b>	2,40 m / 2,65 m / 2,75 m / 2,90 m / 3,00 m
	<b>Breiten</b>	bis 3,00 m		
	<b>Dicken</b>	78 bis 278 mm		
<b>Technische Zulassungen</b>	Europäische Technische Zulassung ETA-09 / 0036 Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-9.1-638			
<b>Holzarten</b>	Fichte (Picea abies) aus heimischen Wäldern; weitere Holzarten auf Anfrage			
<b>Lamellen</b>	19 bis 40 mm, maschinell getrocknet, gütesortiert und keilgezinkt			
<b>Festigkeitsklasse der Lamellen</b>	C24 nach EN 338 (entspricht S10 nach DIN 4074) Ein Anteil von max. 10% C16 ist zulässig (vgl. ETA-09 / 0036)			
<b>Verleimung</b>	Klebstoff auf Melaminharzbasis, Klebstofftyp I nach EN 301 zugelassen für die Verleimung von tragenden Holzbauteilen im Innen- und Außenbereich, bewitterungsbeständig mit transparenter Leimfuge			
<b>Rohdichte</b>	ca. 480 kg / m <sup>3</sup>			
<b>Holzfeuchte</b>	12% (+ / - 2%) bei Auslieferung			
<b>Formveränderung</b>	zur Plattenebene	0,01 % je % Holzfeuchtänderung		
	⊥ zur Plattenebene	0,20 % je % Holzfeuchtänderung		
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	$\lambda = 0,13 \text{ W / mK}$			
<b>Wärmekapazität</b>	$c = 1,60 \text{ kJ / kgK}$			
<b>Diffusionswiderstand</b>	$\mu = 60$ (bei 12% Holzfeuchte)			
<b>Luftdichtheit</b>	Ab 95 mm Plattendicke luftdicht			
<b>Schallschutz</b>	Abhängig vom Wand- bzw. Deckenaufbau → siehe geprüfte Musterwandaufbauten			
<b>Brandverhalten</b>	Nach EN 13501: D, s2, d0 (normal entflammbar, mittlere Rauchentwicklung, kein brennendes Abtropfen)			
<b>Rechnerische Abbrandrate</b>	0,7 - 0,8 mm / min (abhängig vom Plattenaufbau)			
<b>Nutzungsklassen</b>	Nutzungsklassen 1 oder 2 gem. ETA-09 / 0036			

LIEFERPROGRAMM

**M1 BSP crossplan**



**Lieferprogramm**

Bezeichnung		Schichten	Schichtenaufbau Fett = Parallel zu den Decklagen					Dicke	Standardbreiten	Länge	Eigengewicht
M1 BSP crossplan			mm					mm	m	m	kN / m <sup>2</sup>
78	3s	3	25	28	25			78			0,38
94	3s	3	33	28	33			94			0,45
95	5s	5	19	19	19	19	19	95			0,46
98	3s	3	32	34	32			98			0,47
106	3s	3	39	28	39			106			0,51
118	3s	3	39	40	39			118			0,57
134	5s	5	26	27	28	27	26	134			0,65
140	5s	5	32	25	26	25	32	140	2,40		0,67
146	5s	5	32	27	28	27	32	146	2,65		0,70
160	5s	5	39	27	28	27	39	160	2,75	max. 16,50	0,77
173	5s	5	40	27	39	27	40	173	2,90		0,83
184	5s	5	39	33	40	33	39	184	3,00		0,89
198	5s	5	39	40	40	40	39	198			0,95
214	7s	7	39	27	27	28	27	27	39		1,03
214	7ss	7	39	27	27	28	27	27	39		1,03
240	7s	7	39	27	40	28	40	27	39		1,16
240	7ss	7	39	40	27	28	27	40	39		1,16
258	7ss	7	39	40	33	34	33	40	39		1,24
278	7ss	7	39	40	40	40	40	40	39		1,34

ss: äußere Lagen bestehen aus 2 faserparallelen Decklagen.

Weitere Dimensionen (z.B. optimiert für 2-achsige Lastabtragung) auf Anfrage möglich.

Je nach Anwendungsfall kann die Ausrichtung der Decklage längs (DL) oder quer (DQ) gewählt werden.

STATIK

M1 BSP crossplan

**Materialkennwerte**  
(It. BAZ Nr. Z-9.1-638)

Eigenschaft		Zahlenwert
<b>Festigkeitsklassen der Bretter</b>		
<b>S10</b>		
<b>E-Modul faserparallel</b> • Für die Brettlagen faserparallel in Tragrichtung	$E_{\parallel}$	11000,00 [N / mm <sup>2</sup> ]
<b>E-Modul rechtwinklig</b>	$E_{\perp}$	370,00 [N / mm <sup>2</sup> ]
<b>Schubmodul</b> • Infolge Rollschubbeanspruchung	$G_R$	50,00 [N / mm <sup>2</sup> ]
<b>Rollschub</b> • Rollschubspannung der Querlagen	zul $\tau_{\parallel}$	0,45 [N / mm <sup>2</sup> ]
<b>Biegung</b>	zul $\sigma_B$	10,00 [N / mm <sup>2</sup> ]
<b>Zug parallel</b> • Für die Brettlagen faserparallel in Tragrichtung	zul $\sigma_{z,\parallel}$	7,00 [N / mm <sup>2</sup> ]
<b>Zug rechtwinklig</b>	zul $\sigma_{z,\perp}$	0,05 [N / mm <sup>2</sup> ]
<b>Druck parallel</b> • Für die Brettlagen in Faserrichtung	zul $\sigma_{d,\parallel}$	8,50 [N / mm <sup>2</sup> ]
<b>Druck rechtwinklig</b> • Bei unbedenklichen Eindrückungen ist eine Erhöhung um 20% erlaubt	zul $\sigma_{d,\perp}$	2,00 [N / mm <sup>2</sup> ]

**Rechenwerte  $I_{eff}$**

Bezeichnung	Aufbau		$A_{vol}$	$A_{netto}$	$I_{netto}$	$I_{eff}$ (in Abhängigkeit der Stützweite Einfeldträger)															
	M1 BSP crossplan	Fett = parallel zur Faserrichtung der Decklagen				$(b \cdot x^3) / 12$	1,00 m		2,00 m		2,50 m		3,00 m		4,00 m		6,00 m		8,00 m		
							$I_{eff}$	$I_{eff}/I_{vol}$	$I_{eff}$	$I_{eff}/I_{vol}$	$I_{eff}$	$I_{eff}/I_{vol}$									
Dicken	Lagen	[mm]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]				
[mm]	[ ]	[mm]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]	[cm <sup>4</sup> ]	[%]				
78	3s	25 28 25	780	500	3955	2255	57	3211	81	3391	86	3498	88	3612	91	3699	94	3730	94		
94	3s	33 28 33	940	660	6922	3664	53	5508	80	5889	85	6123	88	6376	92	6572	95	6644	96		
95	5s	19 19 19 19 19	950	570	7145	3248	45	4760	67	5047	71	5219	73	5402	76	5542	78	5592	78		
98	3s	32 34 32	980	640	7843	3741	48	5927	76	6408	82	6707	86	7037	90	7294	93	7389	94		
106	3s	39 28 39	1060	780	9925	4994	50	7741	78	8347	84	8723	88	9138	92	9463	95	9583	97		
118	3s	39 40 39	1180	780	13692	5507	40	9539	70	10564	77	11231	82	11994	88	12612	92	12845	94		
134	5s	26 27 28 27 26	1340	800	20051	6483	32	11455	57	12666	63	13443	67	14320	71	15023	75	15286	76		
140	5s	32 25 26 25 32	1400	900	22867	7511	33	13704	60	15296	67	16336	71	17527	77	18496	81	18862	82		
146	5s	32 27 28 27 32	1460	920	25934	7959	31	14884	57	16722	64	17936	69	19340	75	20493	79	20931	81		
160	5s	39 27 28 27 39	1600	1060	34133	9859	29	19338	57	22075	65	23938	70	26152	77	28017	82	28737	84		
173	5s	39 28 39 28 39	1730	1170	43148	11870	28	23466	54	26867	62	29196	68	31978	74	34334	80	35246	82		
184	5s	39 33 40 33 39	1840	1180	51913			25658	49	29853	58	32807	63	36425	70	39567	76	40805	79		
198	5s	39 40 40 40 39	1980	1180	64687			28216	44	33493	52	37340	58	42207	65	46580	72	48342	75		
214	7s	39 27 27 28 27 27 39	2140	1320	81670					48650	60	52680	65	57453	70	61462	75	63008	77		
214	7s	39 27 27 28 27 27 39	2140	1600	81670					49619	61	55525	68	63182	77	70243	86	73137	90		
240	7s	39 27 40 28 40 27 39	2400	1580	115200						73025	63	79582	69	85078	74	87195	76			
240	7s	39 40 27 28 27 40 39	2400	1860	115200						76001	66	87804	76	99117	86	103879	90			
258	7s	39 40 33 34 33 40 39	2580	1920	143113								102032	71	117910	82	124844	87			
278	7s	39 40 40 40 40 40 39	2780	1980	179041									118227	66	140134	78	150028	84		

Alle Angaben beziehen sich auf einen 1 m breiten Plattenstreifen

- $A_{netto}$  Querschnittswert für den Nachweis der Druckspannungen in Richtung der Decklage
- $A_2$  Querschnittswert für den Nachweis der Schubspannungen für Lastabtragung in Richtung der Decklage
- $I_{vol}$  Trägheitsmoment des Vollquerschnittes - nur als Vergleichswert
- $I_{effektiv}$  Trägheitsmoment für den Verbundquerschnitt inklusive des Schubverformungsanteils für die Lastabtragung in Richtung der Decklagen
- $I_{effektiv} / I_{vol}$  Verhältniswert der angibt, inwieweit die Querlagen das Trägheitsmoment des Querschnitts verändern
- $W_{effektiv}$  Widerstandsmoment für die Spannungsnachweise infolge Biegemomente =  $I_{effektiv}$

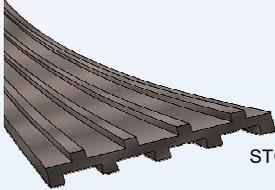
## 2.2 Fugenband Trelleborg



**TRELLEBORG**

**TRELLEBORG**  
**Zellkautschuk Trittschalldämmung**





STG 50



STG 45

**VERWENDUNGSZWECK:**

- Trittschalldämmung
- reduziert störende Trittschallgeräusche die oft in Böden oder Gebälken entstehen
- Vermeidung von Feuchtetaschen unter Balkonrosten (STG 45)

**VORTEILE**

- nimmt kein Wasser auf, Wasser hat keinen Einfluss auf das Material
- hohe Temperaturbeständigkeit
- chemische Stabilität, bei Kontakt mit anderen Materialien verändert sich EPDM nicht
- beinhaltet keine Weichmacher und Additive, Recycling fähig
- hohe Alterungsbeständigkeit
- winddicht und wärmedämmend

**PRODUKTDATEN**

<b>Zusammensetzung:</b>	EPDM – Zellkautschuk (STG 45)
	EPDM – Massivgummi (STG 50)
<b>Typ:</b>	STG 45    STG 50
<b>Dimension, mm:</b>	45x10    50x5
<b>Rollenlänge, m:</b>	50        50
<b>Kartoninhalt, Rl:</b>	3         4
<b>Temperaturbeständigkeit:</b>	- 40 °C bis + 150 °C
<b>sd - Wert:</b>	ca.130 m
<b>Alterungsbeständigkeit:</b>	mindestens 50 Jahre
<b>Lagerung:</b>	kühl und trocken
<b>UV- Beständigkeit:</b>	uneingeschränkt beständig
<b>Belastungsdeformation:</b>	STG 45 bis 3.000 kg/m
	STG 50 bis 9.800 kg/m (bei mehrgeschossigen Häusern einsetzbar)
<b>Farbe:</b>	schwarz

**VERARBEITUNG**  
Die Dichtung wird ohne Stifte oder Nägel montiert. Kann bei Bedarf mit der Klebepaste 3300 geklebt werden.

10.2010/ GB/BP

www.isocell.at    Info- Tel.: +43 (0) 6216 / 4108

Luftdichtheitssysteme
Zellulosedämmung

### 3 Anhang C - Ergebnisse der subjektiven Bewertung

#### 3.1 Rohbauphasen

Z	Messung	Note	Anmerkung
1	BR1 BP3 G1 W1 P1 FG	1	
2	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD	1	
3	BR1 BP3 G1 W3 P1 FG	1	
4	BR1 BP3 G1 W3 P1 HD	1	
5	BR1 BP3 G1 W3 P2 FG	1	
6	BR1 BP3 G1 W3 P2 HD	1	
7	BR1 BP3 G1 W4 P1 FG	1	
8	BR1 BP3 G1 W4 P1 HD	1	
9	BR1 BP3 G1 W4 P2 FG	1	
10	BR1 BP3 G1 W4 P2 HD	1	
11	BR1 BP3 G1 W4 P4 FG	1	
12	BR1 BP3 G1 W4 P4 HD	1-2	Nach dem heel-drop ist ein leichtes Nachschwingen spürbar
13	BR1 BP3 G1 W4 P6 FG	1	
14	BR1 BP3 G1 W4 P6 HD	2	Nach dem heel-drop ist deutlich ein Nachschwingen spürbar
15	BR1 BP3 G2 W1 P1 FG	1	
16	BR1 BP3 G2 W1 P1 HD	1	
17	BR1 BP3 G2 W3 P1 FG	1	
18	BR1 BP3 G2 W3 P1 HD	1	
19	BR1 BP3 G2 W3 P2 FG	1	
20	BR1 BP3 G2 W3 P2 HD	1	
21	BR1 BP3 G2 W4 P1 FG	1	
22	BR1 BP3 G2 W4 P1 HD	1	
23	BR1 BP3 G2 W4 P2 FG	1	
24	BR1 BP3 G2 W4 P2 HD	1	
25	BR1 BP3 G2 W4 P4 FG	1	
26	BR1 BP3 G2 W4 P4 HD	1-2	Nach dem heel-drop ist ein leichtes Nachschwingen spürbar
27	BR1 BP3 G2 W4 P6 FG	1	
28	BR1 BP3 G2 W4 P6 HD	2	Nach dem heel-drop ist deutlich ein Nachschwingen spürbar
29	BR2 BP2 G1 W1 P1 FG	1	
30	BR2 BP2 G1 W1 P1 HD	1	
31	BR2 BP2 G1 W1 P5 FG	1	
32	BR2 BP2 G1 W1 P5 HD	1	

### 3.2 Ausbauphase

Nr.	Messung	Note	Anmerkung
1	BR1 BP4 G1 W1 P1 FG	1	
2	BR1 BP4 G1 W1 P1 HD	1	
3	BR1 BP4 G1 W3 P1 FG	1	
4	BR1 BP4 G1 W3 P1 HD	1	
5	BR1 BP4 G1 W3 P2 FG	1	
6	BR1 BP4 G1 W3 P2 HD	1	
7	BR1 BP4 G1 W4 P1 FG	1	
8	BR1 BP4 G1 W4 P1 HD	1	
9	BR1 BP4 G1 W4 P2 FG	1	
10	BR1 BP4 G1 W4 P2 HD	1	
11	BR1 BP4 G1 W4 P4 FG	1	
12	BR1 BP4 G1 W4 P4 HD	1	
13	BR1 BP4 G1 W4 P6 FG	1	
14	BR1 BP4 G1 W4 P6 HD	1	
15	BR1 BP4 G2 W1 P1 FG	1	
16	BR1 BP4 G2 W1 P1 HD	1	
17	BR1 BP4 G2 W3 P1 FG	1	
18	BR1 BP4 G2 W3 P1 HD	1	
19	BR1 BP4 G2 W3 P2 FG	1	
20	BR1 BP4 G2 W3 P2 HD	1	
21	BR1 BP4 G2 W4 P1 FG	1	
22	BR1 BP4 G2 W4 P1 HD	1	
23	BR1 BP4 G2 W4 P2 FG	1	
24	BR1 BP4 G2 W4 P2 HD	1	
25	BR1 BP4 G2 W4 P4 FG	1	
26	BR1 BP4 G2 W4 P4 HD	1	
27	BR1 BP4 G2 W4 P6 FG	1	
28	BR1 BP4 G2 W4 P6 HD	1	
29	BR2 BP4 G1 W1 P1 FG	1	
30	BR2 BP4 G1 W1 P1 HD	1	
31	BR2 BP4 G1 W1 P5 FG	1	
32	BR2 BP4 G1 W1 P5 HD	1	

## 4 Anhang D - Ergebnisse der Messungen

### 4.1 Schwingungsgrößen Rohbauphasen

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]						Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]						Schrittfreq. (FG) [Hz]	Zeitenster (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	nittl. max	nittl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	nittl. max	nittl. w,max		
1	BR1_BP3_G1_W1_P1_FG	3	Mittelw.	50,41	13,32	140,70	36,21	0,42	13,31	1,14	36,45	1,56					
			Stabw.	9,62	2,10	33,64	6,67	0,07	2,10	0,24	7,77	0,06					
			Median	50,72	13,60	134,69	36,38	0,42	13,60	1,15	36,09						
			95%-Fraktill	62,20	15,67	184,91	44,19	0,49	15,67	1,43	45,96						
			Anzahl	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00			
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-14,95	-7,05	-	-	-6,75	-7,08	-	-	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-24,35	-26,92	-	-	-26,97	-26,91	-	-	-	-	-			
2	BR1_BP3_G1_W1_P1_HD	3	Mittelw.	1938,21	385,19	243,51	52,07	10,06	350,80	1,58	54,39	1,8					
			Stabw.	1087,68	179,33	113,02	20,58	4,75	176,19	0,59	21,44						
			Median	1681,72	358,06	206,77	47,92	8,57	276,74	1,42	47,87						
			95%-Fraktill	3667,84	667,41	418,49	85,55	17,60	657,04	2,55	89,19						
			Anzahl	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-26,76	-21,62	-24,85	-22,22	-22,31	-20,90	-23,77	-22,16						
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-11,65	-26,25	-20,99	-29,07	-24,51	-23,60	-28,12	-29,06						
3	BR1_BP3_G1_W3_P1_FG	2	Mittelw.	50,95	13,32	138,78	34,19	0,41	13,33	1,12	35,77	1,60					
			Stabw.	5,53	2,00	4,19	2,36	0,06	2,01	0,14	3,41	0,10					
			Median	50,95	13,32	138,78	34,19	0,41	13,33	1,12	35,77						
			95%-Fraktill	54,47	14,60	141,45	35,69	0,45	14,60	1,21	37,95						
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	13,33	22,36	-	-	22,14	22,42	-	-						
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-19,80	-24,16	-	-	-23,90	-24,16	-	-						
4	BR1_BP3_G1_W3_P1_HD	2	Mittelw.	1728,18	328,68	221,64	51,81	10,19	331,35	1,57	51,73	1,8					
			Stabw.	800,74	91,72	87,83	13,54	3,33	111,21	0,38	13,54						
			Median	1560,91	345,24	214,48	53,29	9,37	298,92	1,59	53,25						
			95%-Fraktill	2495,50	404,42	303,00	63,42	13,40	439,55	1,90	63,32						
			Anzahl	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-45,41	-23,55	-40,57	-21,24	-35,52	-36,56	-21,27	-21,21						
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-5,12	-14,80	-4,11	-21,94	-22,85	-21,90	-22,31	-21,89						

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnitthf. (FG) [Hz]	Schnitthf. (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittl. max	mittl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.		
5	BRT_BP3_G1_W3_P2_FG	2	Mittelw.	43,50	13,37	126,36	37,39	0,43	13,36	1,23	38,42	1,55			
			Stabw.	1,25	0,68	3,68	0,52	0,02	0,68	0,04	1,96	0,12			
			Median	43,50	13,37	126,36	37,39	0,43	13,36	1,23	38,42				
			95%-Fraktil	44,30	13,80	128,71	37,72	0,45	13,79	1,26	39,67				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	1,87	6,86	-	-	5,92	6,87	-	-	-	-		
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-22,44	-26,64	-	-	-26,86	-26,63	-	-	-	-		
			Mittelw.	1526,33	402,24	268,19	81,42	11,55	391,71	2,49	81,19				
			Stabw.	369,47	87,54	61,37	16,24	3,29	103,71	0,46	16,22				
			Median	1547,17	397,40	270,12	82,41	11,68	389,07	2,51	82,17				
6	BRT_BP3_G1_W3_P2_HD	2	95%-Fraktil	1861,48	491,15	328,40	97,14	14,54	497,84	2,93	96,90				
			Anzahl	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00			
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	2,10	5,55	13,94	16,64	12,35	15,74	15,51	16,68				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-15,53	-25,66	-25,73	-28,83	-26,25	-27,65	-30,60	-28,83				
			Mittelw.	57,19	17,27	152,49	46,32	0,55	17,26	1,51	47,80	1,58			
			Stabw.	24,84	7,23	57,21	16,41	0,21	7,23	0,54	17,65	0,00			
			Median	57,19	17,27	152,49	46,32	0,55	17,26	1,51	47,80				
			95%-Fraktil	73,00	21,88	188,90	56,77	0,68	21,87	1,85	59,03				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	88,05	83,74	-	-	71,71	83,75	-	-	-	-		
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-26,53	-28,01	-	-	-27,83	-28,01	-	-	-	-					
7	BRT_BP3_G1_W4_P1_FG	2	Mittelw.	1898,99	509,22	327,01	90,97	17,03	572,26	2,73	90,81	1,8			
			Stabw.	668,39	69,75	43,58	2,57	2,71	93,92	0,10	2,57				
			Median	1898,99	509,22	327,01	90,97	17,03	572,26	2,73	90,81				
			95%-Fraktil	2324,35	553,61	354,74	92,60	18,75	632,03	2,79	92,45				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-45,50	-19,42	-18,80	-3,93	-22,53	-21,40	-4,51	-3,95				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-17,15	-27,00	-27,00	-29,43	-27,40	-28,79	-30,00	-29,42				
			Mittelw.	57,19	17,27	152,49	46,32	0,55	17,26	1,51	47,80	1,58			
			Stabw.	24,84	7,23	57,21	16,41	0,21	7,23	0,54	17,65	0,00			
			Median	57,19	17,27	152,49	46,32	0,55	17,26	1,51	47,80				
95%-Fraktil	73,00	21,88	188,90	56,77	0,68	21,87	1,85	59,03							
Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	88,05	83,74	-	-	71,71	83,75	-	-	-	-					
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-26,53	-28,01	-	-	-27,83	-28,01	-	-	-	-					
8	BRT_BP3_G1_W4_P1_HD	2	Mittelw.	1898,99	509,22	327,01	90,97	17,03	572,26	2,73	90,81	1,8			
			Stabw.	668,39	69,75	43,58	2,57	2,71	93,92	0,10	2,57				
			Median	1898,99	509,22	327,01	90,97	17,03	572,26	2,73	90,81				
			95%-Fraktil	2324,35	553,61	354,74	92,60	18,75	632,03	2,79	92,45				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-45,50	-19,42	-18,80	-3,93	-22,53	-21,40	-4,51	-3,95				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-17,15	-27,00	-27,00	-29,43	-27,40	-28,79	-30,00	-29,42				
			Mittelw.	57,19	17,27	152,49	46,32	0,55	17,26	1,51	47,80	1,58			
			Stabw.	24,84	7,23	57,21	16,41	0,21	7,23	0,54	17,65	0,00			
			Median	57,19	17,27	152,49	46,32	0,55	17,26	1,51	47,80				
95%-Fraktil	73,00	21,88	188,90	56,77	0,68	21,87	1,85	59,03							
Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	88,05	83,74	-	-	71,71	83,75	-	-	-	-					
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-26,53	-28,01	-	-	-27,83	-28,01	-	-	-	-					

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnittfreq. (FG) [Hz]	Schnittfreq. (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	miffl. max	miffl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.		
9	BR1_BP3_G1_W4_P2_FG	2	Mittelw.	49,25	14,86	134,77	40,77	0,48	14,85	1,33	41,79	1,62			
			Stabw.	8,66	2,71	20,44	6,17	0,08	2,71	0,24	7,16	0,17			
			Median	49,25	14,86	134,77	40,77	0,48	14,85	1,33	41,79				
			95%-Fraktile	54,76	16,58	147,77	44,70	0,53	16,57	1,48	46,35				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	27,09	28,81	-	-	22,77	28,85	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-24,80	-27,26	-	-	-25,30	-27,26	-	-				
10	BR1_BP3_G1_W4_P2_HD	2	Mittelw.	2149,68	318,18	340,16	51,61	16,45	273,65	3,01	51,47	1,8			
			Stabw.	42,73	410,27	36,32	61,50	0,78	339,99	0,20	61,40				
			Median	2149,68	318,18	340,16	51,61	16,45	273,65	3,01	51,47				
			95%-Fraktile	2176,87	579,27	363,28	90,75	16,95	490,02	3,14	90,54				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	0,09	-95,20	17,32	-91,12	11,25	-93,29	10,19	-91,18				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-25,63	-28,90	-27,94	-29,01	-29,25	-28,34	-29,09	-29,00				
11	BR1_BP3_G1_W4_P4_FG	2	Mittelw.	43,60	11,43	123,92	31,91	0,36	11,43	1,02	32,61	1,54			
			Stabw.	14,58	3,99	34,94	8,98	0,12	3,99	0,32	10,28	0,02			
			Median	43,60	11,43	123,92	31,91	0,36	11,43	1,02	32,61				
			95%-Fraktile	52,88	13,97	146,16	37,63	0,44	13,97	1,22	39,16				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	58,86	64,07	-	-	59,59	64,09	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-23,10	-26,32	-	-	-26,34	-26,32	-	-				
12	BR1_BP3_G1_W4_P4_HD	2	Mittelw.	2360,46	578,81	357,72	92,95	15,99	534,98	2,77	92,81	1,8			
			Stabw.	1882,98	389,71	223,95	47,78	10,15	336,43	1,39	47,70				
			Median	2360,46	578,81	357,72	92,95	15,99	534,98	2,77	92,81				
			95%-Fraktile	3558,78	826,81	500,24	123,35	22,44	749,08	3,65	123,16				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-73,50	-65,41	-61,71	-53,10	-63,51	-63,36	-52,34	-53,10				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-16,85	-25,28	-26,32	-28,51	-24,24	-23,79	-28,69	-28,50				

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnitthf. (FG) [Hz]	Zeithfenster (HD) [s]				
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittl. max	mittl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.			mittl. max	mittl. w,max		
13	BRT_BP3_G1_W4_P6_FG	2	Mittelw.	66,94	17,76	175,65	46,29	66,94	17,76	175,65	46,29	0,54	17,76	1,42	46,27	1,60			
			Stabw.	9,22	2,74	15,09	4,67	9,22	2,74	15,09	4,67	0,08	2,74	0,15	4,54	0,09			
			Median	64,16	17,04	172,32	45,48	64,16	17,04	172,32	45,48	0,52	17,04	1,39	45,14				
			95%-Fraktile	78,02	21,01	192,84	51,69	78,02	21,01	192,84	51,69	0,64	21,01	1,59	51,63				
			Anzahl	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00			
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	5,74	9,73	-	-	5,74	9,73	-	-	10,06	9,69	-	-	-			
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-20,95	-21,33	-	-	-20,95	-21,33	-	-	-21,38	-21,33	-	-	-			
			14	BRT_BP3_G1_W4_P6_HD	2	Mittelw.	3258,12	615,61	485,48	112,02	3258,12	615,61	485,48	112,02	17,09	595,55	3,31	111,91	1,8
						Stabw.	1573,98	199,34	181,42	28,61	1573,98	199,34	181,42	28,61	6,15	221,02	0,83	28,60	
						Median	3195,49	621,43	479,19	113,08	3195,49	621,43	479,19	113,08	17,02	596,35	3,34	112,96	
						95%-Fraktile	4787,40	791,32	659,41	137,26	4787,40	791,32	659,41	137,26	22,55	790,04	4,05	137,15	
						Anzahl	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-58,66	-43,05	-48,78	-34,67	-58,66	-43,05	-48,78	-34,67	-50,17	-51,31	-34,36	-34,72	-			
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-18,29	-19,79	-22,01	-22,49	-18,29	-19,79	-22,01	-22,49	-15,04	-17,62	-22,99	-22,49	-						
15	BRT_BP3_G2_W1_P1_FG	2	Mittelw.	51,84	13,95	145,76	36,27	51,84	13,95	145,76	36,27	0,64	13,91	1,43	38,43	1,64			
			Stabw.	10,16	1,46	43,08	9,12	10,16	1,46	43,08	9,12	0,25	1,51	0,09	8,14	0,05			
			Median	51,84	13,95	145,76	36,27	51,84	13,95	145,76	36,27	0,64	13,91	1,43	38,43				
			95%-Fraktile	58,30	14,88	173,18	42,07	58,30	14,88	173,18	42,07	0,80	14,87	1,49	43,61				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00			
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-24,38	-14,57	-	-	-24,38	-14,57	-	-	77,60	-14,82	-	-	-			
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-22,85	-26,01	-	-	-22,85	-26,01	-	-	-26,27	-26,01	-	-	-			
			16	BRT_BP3_G2_W1_P1_HD	2	Mittelw.	1639,60	372,03	215,67	53,45	1639,60	372,03	215,67	53,45	10,33	333,02	1,60	53,34	1,8
						Stabw.	390,03	52,30	14,20	0,05	390,03	52,30	14,20	0,05	1,59	52,44	0,02	0,08	
						Median	1639,60	372,03	215,67	53,45	1639,60	372,03	215,67	53,45	10,33	333,02	1,60	53,34	
						95%-Fraktile	1887,81	405,31	224,71	53,48	1887,81	405,31	224,71	53,48	11,34	366,39	1,61	53,38	
						Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	38,47	23,49	7,53	0,23	38,47	23,49	7,53	0,23	20,10	23,04	-1,92	0,31	-			
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-14,22	-25,98	-23,12	-28,21	-14,22	-25,98	-23,12	-28,21	-22,39	-23,12	-26,82	-28,21	-						

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnitfreq. (FG) [Hz]	Schnitrfreq. (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	miffl. max	miffl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.		
17	BR1_BP3_G2_W3_P1_FG	2	Mittelw.	46,88	13,92	134,18	36,24	1,06	13,91	1,77	37,35	1,59			
			Stabw.	7,58	2,27	22,14	5,66	0,35	2,24	0,58	6,54	0,04			
			Median	46,88	13,92	134,18	36,24	1,06	13,91	1,77	37,35				
			95%-Frakti	51,70	15,37	148,27	39,84	1,28	15,34	2,14	41,51				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				24,64	12,98	-	-	25,24	12,24	-	-				
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-21,09	-3,06	-	-	61,38	-3,15	-	-				
18	BR1_BP3_G2_W3_P1_HD	2	Mittelw.	3470,78	643,76	328,76	73,06	17,25	580,85	2,24	72,94	1,8			
			Stabw.	1287,44	177,39	80,51	8,22	3,44	114,73	0,18	8,25				
			Median	3470,78	643,76	328,76	73,06	17,25	580,85	2,24	72,94				
			95%-Frakti	4290,09	756,65	380,00	78,29	19,44	653,86	2,35	78,19				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				-43,43	-34,80	-31,41	-15,63	-26,54	-26,45	-13,40	-15,69				
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-15,97	-23,31	-22,01	-27,40	-21,39	-22,13	-28,31	-27,38				
19	BR1_BP3_G2_W3_P2_FG	2	Mittelw.	50,66	18,40	150,67	47,04	1,71	18,39	2,64	49,12	1,62			
			Stabw.	11,04	4,03	39,38	11,37	0,94	4,07	1,08	12,19	0,03			
			Median	55,05	19,14	165,60	51,61	1,29	19,14	2,04	55,07				
			95%-Frakti	58,45	21,72	178,92	55,03	2,63	21,75	3,71	56,97				
			Anzahl	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00		
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				54,65	37,97	-	-	7,90	38,42	-	-				
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-22,93	-19,67	-	-	0,26	-19,54	-	-				
20	BR1_BP3_G2_W3_P2_HD	2	Mittelw.	2517,27	593,62	383,07	107,43	18,65	615,59	3,24	107,16	1,5			
			Stabw.	1187,13	140,81	122,37	19,61	5,69	185,66	0,58	19,61				
			Median	2517,27	593,62	383,07	107,43	18,65	615,59	3,24	107,16				
			95%-Frakti	3272,75	683,23	460,95	119,90	22,27	733,74	3,61	119,64				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				-56,10	-32,11	-39,63	-23,48	-39,94	-39,28	-23,12	-23,53				
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-9,98	-22,42	-21,60	-27,55	-21,55	-21,16	-27,59	-27,54				

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schrittfreq. (FG) [Hz]	Schriftfenster (HD) [s]															
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittl. max	mittl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.			mittl. max	mittl. w,max													
21	BRT_BP3_G2_W4_P1_FG	2	Mittelw.	75,50	22,74	213,38	64,48	75,50	22,74	213,38	64,48	75,50	22,74	213,38	64,48	75,50	22,74	213,38	64,48	75,50	22,74	213,38	64,48	1,60						
			Stabw.	9,73	2,40	13,11	3,98	9,73	2,40	13,11	3,98	9,73	2,40	13,11	3,98	9,73	2,40	13,11	3,98	9,73	2,40	13,11	3,98	9,73	0,00					
			Median	75,50	22,74	213,38	64,48	75,50	22,74	213,38	64,48	75,50	22,74	213,38	64,48	75,50	22,74	213,38	64,48	75,50	22,74	213,38	64,48	75,50	22,74	213,38	64,48			
			95%-Fraktill	81,70	24,26	221,72	67,02	81,70	24,26	221,72	67,02	81,70	24,26	221,72	67,02	81,70	24,26	221,72	67,02	81,70	24,26	221,72	67,02	81,70	24,26	221,72	67,02			
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	15,24	15,36	-	-	15,24	15,36	-	-	15,24	15,36	-	-	15,24	15,36	-	-	15,24	15,36	-	-	15,24	15,36	-	-			
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-20,91	-26,31	-	-	-20,91	-26,31	-	-	-20,91	-26,31	-	-	-20,91	-26,31	-	-	-20,91	-26,31	-	-	-20,91	-26,31	-	-			
			22	BRT_BP3_G2_W4_P1_HD	2	Mittelw.	2550,25	574,52	382,72	104,50	2550,25	574,52	382,72	104,50	2550,25	574,52	382,72	104,50	2550,25	574,52	382,72	104,50	2550,25	574,52	382,72	104,50	1,8			
						Stabw.	1585,38	202,59	167,24	33,18	1585,38	202,59	167,24	33,18	1585,38	202,59	167,24	33,18	1585,38	202,59	167,24	33,18	1585,38	202,59	167,24	33,18	1585,38	202,59	167,24	33,18
						Median	2550,25	574,52	382,72	104,50	2550,25	574,52	382,72	104,50	2550,25	574,52	382,72	104,50	2550,25	574,52	382,72	104,50	2550,25	574,52	382,72	104,50	2550,25	574,52	382,72	104,50
95%-Fraktill	3559,18	703,44				489,15	125,62	3559,18	703,44	489,15	125,62	3559,18	703,44	489,15	125,62	3559,18	703,44	489,15	125,62	3559,18	703,44	489,15	125,62	3559,18	703,44	489,15	125,62			
Anzahl	2,00	2,00				2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-64,44	-41,70				-48,88	-36,95	-64,44	-41,70	-48,88	-36,95	-64,44	-41,70	-48,88	-36,95	-64,44	-41,70	-48,88	-36,95	-64,44	-41,70	-48,88	-36,95	-64,44	-41,70	-48,88	-36,95			
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-16,37	-24,77				-24,82	-28,46	-16,37	-24,77	-24,82	-28,46	-16,37	-24,77	-24,82	-28,46	-16,37	-24,77	-24,82	-28,46	-16,37	-24,77	-24,82	-28,46	-16,37	-24,77	-24,82	-28,46			
23	BRT_BP3_G2_W4_P2_FG	2				Mittelw.	62,25	20,04	170,34	51,24	62,25	20,04	170,34	51,24	62,25	20,04	170,34	51,24	62,25	20,04	170,34	51,24	62,25	20,04	170,34	51,24	1,61			
						Stabw.	14,17	2,57	35,83	9,73	14,17	2,57	35,83	9,73	14,17	2,57	35,83	9,73	14,17	2,57	35,83	9,73	14,17	2,57	35,83	9,73	14,17	2,57	35,83	9,73
						Median	62,25	20,04	170,34	51,24	62,25	20,04	170,34	51,24	62,25	20,04	170,34	51,24	62,25	20,04	170,34	51,24	62,25	20,04	170,34	51,24	62,25	20,04	170,34	51,24
			95%-Fraktill	71,27	21,68	193,14	57,43	71,27	21,68	193,14	57,43	71,27	21,68	193,14	57,43	71,27	21,68	193,14	57,43	71,27	21,68	193,14	57,43	71,27	21,68	193,14	57,43			
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	34,33	10,97	-	-	34,33	10,97	-	-	34,33	10,97	-	-	34,33	10,97	-	-	34,33	10,97	-	-	34,33	10,97	-	-			
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-20,65	-13,16	-	-	-20,65	-13,16	-	-	-20,65	-13,16	-	-	-20,65	-13,16	-	-	-20,65	-13,16	-	-	-20,65	-13,16	-	-			
			24	BRT_BP3_G2_W4_P2_HD	2	Mittelw.	1886,10	517,30	323,99	95,01	1886,10	517,30	323,99	95,01	1886,10	517,30	323,99	95,01	1886,10	517,30	323,99	95,01	1886,10	517,30	323,99	95,01	1,8			
						Stabw.	155,89	9,71	33,42	0,93	155,89	9,71	33,42	0,93	155,89	9,71	33,42	0,93	155,89	9,71	33,42	0,93	155,89	9,71	33,42	0,93	155,89	9,71	33,42	0,93
						Median	1886,10	517,30	323,99	95,01	1886,10	517,30	323,99	95,01	1886,10	517,30	323,99	95,01	1886,10	517,30	323,99	95,01	1886,10	517,30	323,99	95,01	1886,10	517,30	323,99	95,01
95%-Fraktill	1985,31	523,47				345,26	95,60	1985,31	523,47	345,26	95,60	1985,31	523,47	345,26	95,60	1985,31	523,47	345,26	95,60	1985,31	523,47	345,26	95,60	1985,31	523,47	345,26	95,60			
Anzahl	2,00	2,00				2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-18,74	-3,59				-14,47	-1,44	-18,74	-3,59	-14,47	-1,44	-18,74	-3,59	-14,47	-1,44	-18,74	-3,59	-14,47	-1,44	-18,74	-3,59	-14,47	-1,44	-18,74	-3,59	-14,47	-1,44			
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-14,77	-25,60				-26,26	-28,43	-14,77	-25,60	-26,26	-28,43	-14,77	-25,60	-26,26	-28,43	-14,77	-25,60	-26,26	-28,43	-14,77	-25,60	-26,26	-28,43	-14,77	-25,60	-26,26	-28,43			

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnittfreq. (FG) [Hz]	Schnittfreq. (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	miffl. max	miffl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.		
25	BR1_BP3_G2_W4_P4_FG	2	Mittelw.	73,82	19,46	214,04	54,33	0,62	19,46	1,77	56,83	1,69			
			Stabw.	13,32	3,88	30,72	9,57	0,14	3,88	0,32	9,54	0,02			
			Median	73,82	19,46	214,04	54,33	0,62	19,46	1,77	56,83				
			95%-Fraktile	82,30	21,93	233,59	60,42	0,70	21,93	1,98	62,90				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	31,58	32,78	-	-	47,42	32,87	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-23,06	-25,41	-	-	-25,03	-25,41	-	-				
26	BR1_BP3_G2_W4_P4_HD	2	Mittelw.	3079,26	704,69	393,57	100,28	3,00	100,07	664,64	3,00	100,07	1,8		
			Stabw.	1860,31	359,25	181,71	38,97	0,97	323,22	1,12	38,95				
			Median	3079,26	704,69	393,57	100,28	19,96	664,64	3,00	100,07				
			95%-Fraktile	4263,16	933,31	509,21	125,07	25,73	870,34	3,71	124,86				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-62,62	-53,96	-50,55	-43,21	-50,93	-52,73	-42,24	-43,26				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-14,15	-24,77	-24,05	-27,80	-22,81	-22,90	-27,84	-27,80				
27	BR1_BP3_G2_W4_P6_FG	2	Mittelw.	66,20	18,34	189,88	53,78	0,59	18,26	1,70	54,24	1,65			
			Stabw.	9,76	3,72	11,74	8,36	0,10	3,61	0,28	8,50	0,07			
			Median	66,20	18,34	189,88	53,78	0,59	18,26	1,70	54,24				
			95%-Fraktile	72,41	20,71	197,36	59,10	0,65	20,55	1,87	59,65				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	20,99	30,56	-	-	9,36	29,67	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-18,81	-18,83	-	-	0,76	-18,86	-	-				
28	BR1_BP3_G2_W4_P6_HD	3	Mittelw.	3326,70	633,41	463,90	103,16	3,11	103,00	651,00	3,11	103,00	1,8		
			Stabw.	1453,14	244,10	165,79	32,30	6,93	238,77	0,95	32,28				
			Median	3944,11	701,78	532,85	107,59	22,19	745,02	3,25	107,48				
			95%-Fraktile	4233,04	825,89	569,37	133,43	24,69	809,39	3,98	133,21				
			Anzahl	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-73,07	-62,35	-60,79	-48,32	-60,78	-61,66	-47,20	-48,39				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-12,07	-17,76	-22,44	-23,14	-20,42	-22,97	-24,08	-23,13				

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schrittfreq. (FG) [Hz]	Schriftfenster (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittl. max	mittl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.		
29	BR2_BP2_G1_W1_P1_FG	2	Mittelw.	78,76	20,64	223,63	55,89	0,64	20,63	1,81	57,79	1,56			
			Stabw.	14,39	4,86	32,67	10,28	0,14	4,85	0,30	9,93	0,06			
			Median	80,26	20,90	221,74	55,45	0,65	20,89	1,79	57,20				
			95%-Fraktill	91,38	24,93	258,34	66,37	0,76	24,91	2,11	67,89				
30	BR2_BP2_G1_W1_P1_HD	2	Anzahl	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00			
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	40,67	57,30	-	-	52,83	57,26	-	-	-	-		
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-22,08	-25,51	-	-	-25,62	-25,51	-	-	-	-		
			Mittelw.	3272,47	664,92	406,71	93,78	17,31	570,76	3,01	91,02	1,8			
31	BR2_BP2_G1_W1_P5_FG	2	Stabw.	1840,19	294,19	193,50	36,25	8,01	262,39	1,62	39,85				
			Median	2714,44	639,84	398,99	99,51	16,70	562,67	2,97	99,37				
			95%-Fraktill	5520,55	999,77	622,59	130,03	26,56	866,81	5,11	129,62				
			Anzahl	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00			
32	BR2_BP2_G1_W1_P5_HD	2	rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-73,62	-66,28	-69,32	-61,47	-64,76	-66,11	-64,29	-65,26				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-10,58	-21,39	-22,02	-26,99	-19,24	-19,95	-27,24	-26,97				
			Mittelw.	2396,12	553,05	325,10	74,20	73,71	16,85	219,24	50,04	0,52	16,85	1,51	49,97
			Stabw.	689,28	166,92	86,09	21,68	7,01	1,35	23,07	5,42	0,03	1,35	0,18	5,84
33	BR2_BP2_G1_W1_P5_HD	2	Median	2168,38	539,82	304,45	74,29	73,20	16,78	222,05	50,47	0,52	16,78	1,53	50,50
			95%-Fraktill	3254,90	753,86	430,40	98,31	80,66	18,17	239,10	54,93	0,55	18,17	1,65	55,05
			Anzahl	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-18,16	-14,93	-	-	-12,32	-14,93	-	-	-12,32	-14,93	-	-
34	BR2_BP2_G1_W1_P5_HD	2	rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-23,45	-26,25	-	-	-26,78	-26,24	-	-	-	-	-	
			Mittelw.	2396,12	553,05	325,10	74,20	15,79	541,65	2,22	74,08	1,8			
			Stabw.	689,28	166,92	86,09	21,68	4,70	162,73	0,58	21,66				
			Median	2168,38	539,82	304,45	74,29	15,86	538,02	2,21	74,16				
35	BR2_BP2_G1_W1_P5_HD	2	95%-Fraktill	3254,90	753,86	430,40	98,31	21,22	732,94	2,88	98,18				
			Anzahl	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00			
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-4,81	36,10	5,49	49,97	40,41	42,38	42,68	49,83				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-11,31	-19,03	-16,63	-24,58	-16,44	-20,04	-28,55	-24,52				

## 4. 2 Schwingungsgrößen Ausbauphase

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnittrfq. (FG) [Hz]	Zeitfenster (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittl. max	mittl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.		
1	BRT_BP4_G1_W1_P1_FG	3	Mittelw.	21,17	7,45	76,59	22,98	0,28	7,44	0,80	23,87	1,45			
			Stabw.	2,94	0,65	15,16	3,07	0,02	0,65	0,10	3,46	0,08			
			Median	20,49	7,25	76,53	22,81	0,28	7,24	0,80	24,18				
			95%-Fraktil	24,01	8,08	90,25	25,80	0,30	8,07	0,89	26,87				
			Anzahl	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00			
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				23,33	15,21	-	-	19,33	15,19	-	-				
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-3,02	-10,06	-	-	-11,09	-10,04	-	-				
2	BRT_BP4_G1_W1_P1_HD	3	Mittelw.	2533,59	561,36	363,04	104,73	20,96	663,23	3,32	104,45	1			
			Stabw.	700,48	110,49	71,88	13,83	3,86	125,58	0,45	13,80				
			Median	2402,06	545,31	359,71	105,94	22,66	708,60	3,46	105,66				
			95%-Fraktil	3201,67	665,63	428,84	116,72	23,58	754,71	3,67	116,41				
			Anzahl	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00			
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				-40,60	-29,29	-32,10	-23,61	-29,06	-27,75	-26,21	-23,62				
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-51,76	-47,94	-44,08	-43,06	-52,54	-52,67	-41,73	-43,04				
3	BRT_BP4_G1_W3_P1_FG	2	Mittelw.	31,79	11,19	122,22	33,75	0,39	11,18	1,22	37,00	1,49			
			Stabw.	10,37	3,37	34,63	9,03	0,10	3,38	0,31	10,78	0,12			
			Median	31,79	11,19	122,22	33,75	0,39	11,18	1,22	37,00				
			95%-Fraktil	38,39	13,34	144,26	39,49	0,46	13,33	1,42	43,86				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00			
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				-38,68	-36,54	-	-	-33,84	-36,65	-	-				
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-0,69	-9,61	-	-	-7,50	-9,60	-	-				
4	BRT_BP4_G1_W3_P1_HD	2	Mittelw.	2859,03	573,77	345,83	96,11	19,87	633,89	3,05	95,79	1			
			Stabw.	1529,84	213,19	112,62	12,54	5,53	185,95	0,43	12,58				
			Median	2859,03	573,77	345,83	96,11	19,87	633,89	3,05	95,79				
			95%-Fraktil	3832,61	709,45	417,50	104,09	23,40	752,22	3,32	103,79				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00			
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				-46,30	-31,81	-31,80	-14,88	-27,86	-27,40	-18,13	-14,94				
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-60,46	-54,00	-45,97	-39,59	-53,59	-53,39	-38,81	-39,60				

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnitthf. (FC) [Hz]	Schnitthf. (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mithl. max	mithl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.		
5	BRT_BP4_G1_W3_P2_FG	2	Mittelw.	31,32	9,28	128,44	31,52	0,35	9,27	1,04	31,94	1,41			
			Stabw.	4,81	1,43	7,22	2,44	0,04	1,43	0,13	4,02	0,19			
			Median	31,32	9,28	128,44	31,52	0,35	9,27	1,04	31,94				
			95%-Fraktile	34,38	10,19	133,04	33,07	0,37	10,18	1,12	34,49				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-25,59	-27,21	-	-	-23,20	-27,19	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-7,51	-5,27	-	-	-3,34	-5,31	-	-				
			Mittelw.	2784,52	707,29	350,69	95,12	3,04	94,89						
			Stabw.	248,28	112,69	26,29	16,04	0,38	15,98						
			Median	2784,52	707,29	350,69	95,12	3,04	94,89						
95%-Fraktile	2942,52	779,01	367,42	105,33	3,28	105,06									
Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00									
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	14,65	27,29	10,18	25,98	26,96	25,90									
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-44,71	-54,42	-50,63	-58,58	-59,74	-58,55									
6	BRT_BP4_G1_W4_P1_FG	2	Mittelw.	24,29	10,24	76,33	25,04	0,72	10,24	1,26	26,08	1,49			
			Stabw.	3,72	2,15	14,55	3,51	0,68	2,18	0,77	3,88	0,08			
			Median	23,30	9,54	69,04	23,57	0,34	9,52	0,83	24,67				
			95%-Fraktile	27,88	12,34	90,68	28,49	1,38	12,36	2,02	29,89				
			Anzahl	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	28,93	37,67	-	-	370,02	-7,17	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-5,28	-13,96	-	-	-15,28	-13,95	-	-				
			Mittelw.	2222,67	444,21	318,57	101,53	3,19	101,20						
			Stabw.	1224,19	169,37	86,79	8,91	0,28	8,94						
			Median	2222,67	444,21	318,57	101,53	3,19	101,20						
95%-Fraktile	3001,74	552,00	373,80	107,20	3,36	106,89									
Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00									
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-55,57	-32,21	-28,95	-9,74	-29,04	-9,80									
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-41,20	-44,25	-33,22	-29,39	-42,89	-29,40									

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s²]						Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]						Schnittrfq. (FG) [Hz]	Zeitfenster (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	miffl. max	miffl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	miffl. max	miffl. w,max		
9	BR1_BP4_G1_W4_P2_FG	2	Mittelw.	23,22	7,16	95,63	24,27	0,28	7,15	0,80	24,38	1,44					
			Stabw.	3,84	1,45	6,23	3,25	0,05	1,45	0,12	4,00	0,18					
			Median	23,22	7,16	95,63	24,27	0,28	7,15	0,80	24,38						
			95%-Fraktill	25,66	8,08	99,59	26,34	0,30	8,07	0,88	26,93						
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-19,77	-23,58	-	-	-19,97	####	-	-	-					
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-4,51	-9,99	-	-	-11,73	-9,97	-	-	-					
10	BR1_BP4_G1_W4_P2_HD	2	Mittelw.	3292,65	660,09	381,91	88,34	20,54	661,32	2,76	88,17	1					
			Stabw.	1145,06	135,70	95,58	9,61	4,18	143,72	0,29	9,62						
			Median	3791,12	720,36	399,65	87,71	19,92	632,03	2,78	87,54						
			95%-Fraktill	4072,69	751,73	460,60	97,19	24,49	798,89	3,01	97,04						
			Anzahl	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00					
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-38,72	-25,58	-30,50	-12,12	-13,25	-13,27	-11,86	-12,15						
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-49,96	-51,79	-43,30	-50,71	-52,46	-49,73	-52,15	-50,67						
11	BR1_BP4_G1_W4_P4_FG	2	Mittelw.	25,74	7,51	96,90	24,43	0,27	7,50	0,79	24,64	1,52					
			Stabw.	0,44	0,13	1,30	0,91	0,01	0,13	0,05	1,71	0,02					
			Median	25,74	7,51	96,90	24,43	0,27	7,50	0,79	24,64						
			95%-Fraktill	26,02	7,59	97,73	25,01	0,27	7,58	0,82	25,73						
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-0,59	-3,08	-	-	-3,77	-3,06	-	-						
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-11,93	-18,97	-	-	-20,84	-18,96	-	-						
12	BR1_BP4_G1_W4_P4_HD	2	Mittelw.	2499,63	613,73	327,34	87,76	18,04	591,00	2,72	87,60	1					
			Stabw.	417,94	49,07	39,64	2,70	1,63	57,15	0,10	2,70						
			Median	2499,63	613,73	327,34	87,76	18,04	591,00	2,72	87,60						
			95%-Fraktill	2765,60	644,98	352,57	89,47	19,07	627,37	2,78	89,32						
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-19,25	-12,37	-17,30	-7,84	-13,05	-13,65	-6,39	-7,85						
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-42,71	-46,68	-41,99	-49,65	-51,54	-50,25	-50,40	-49,61						

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnitthf. (FG) [Hz]	Schnitthf. (HD) [s]	
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittle. max	mittle. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.			mittle. max
13	BRT_BP4_G1_W4_P6_FG	2	Mittelw.	21,65	6,79	90,56	22,96	0,24	6,78	0,76	23,60	1,47				
			Stabw.	1,40	0,61	5,70	2,50	0,02	0,61	0,10	3,49	0,08				
			Median	21,65	6,79	90,56	22,96	0,24	6,78	0,76	23,60					
			95%-Fraktil	22,54	7,18	94,19	24,55	0,26	7,17	0,83	25,82					
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-12,04	-12,16	-	-	-12,09	-12,17	-	-					
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	2,59	-3,17	-	-	-0,78	-3,16	-	-					
			14	BRT_BP4_G1_W4_P6_HD	2	Mittelw.	3276,35	678,41	384,49	98,29	21,48	704,26	3,01	98,12	1	
						Stabw.	892,95	143,42	78,71	11,68	3,15	112,75	0,34	11,66		
						Median	3276,35	678,41	384,49	98,29	21,48	704,26	3,01	98,12		
						95%-Fraktil	3844,62	769,68	434,58	105,72	23,49	776,01	3,23	105,55		
						Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
						rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-20,29	-16,98	-19,82	-13,06	-13,83	-15,23	-10,66	-13,04		
15	BRT_BP4_G2_W1_P1_FG	2	Mittelw.	21,28	7,06	80,21	22,03	0,26	7,06	0,78	23,43	1,44				
			Stabw.	0,04	0,09	0,61	0,52	0,00	0,08	0,03	0,06	0,12				
			Median	21,28	7,06	80,21	22,03	0,26	7,06	0,78	23,43					
			95%-Fraktil	21,31	7,12	80,60	22,36	0,27	7,11	0,80	23,47					
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00					
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-3,36	-0,32	-	-	-1,19	-0,42	-	-					
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-1,33	-9,94	-	-	-13,47	-9,84	-	-					
			16	BRT_BP4_G2_W1_P1_HD	2	Mittelw.	3197,68	655,63	422,76	108,15	20,82	674,96	3,34	107,92	1	
						Stabw.	657,52	82,95	37,10	5,36	0,12	2,68	0,14	5,37		
						Median	3197,68	655,63	422,76	108,15	20,82	674,96	3,34	107,92		
						95%-Fraktil	3616,12	708,41	446,37	111,56	20,89	676,66	3,43	111,33		
						Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
						rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-20,01	-8,55	-4,35	10,83	3,15	3,83	6,38	10,87		
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-55,57	-50,46	-44,27	-39,85	-47,06	-46,60	-38,29	-39,85								

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s²]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnittr. (FG) [Hz]	Zeitfenster (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittle. max	mittle. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.		
17	BR1_BP4_G2_W3_P1_FG	2	Mittelw.	26,87	9,11	102,77	27,52	0,33	9,10	0,99	29,72	1,48			
			Stabw.	5,18	1,38	15,71	2,23	0,04	1,38	0,10	4,28	0,15			
			Median	26,87	9,11	102,77	27,52	0,33	9,10	0,99	29,72				
			95%-Fraktile	30,16	9,99	112,77	28,94	0,36	9,98	1,05	32,44				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-28,19	-24,08	-	-	-24,27	-24,25	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-4,62	-10,72	-	-	-8,31	-10,54	-	-				
18	BR1_BP4_G2_W3_P1_HD	2	Mittelw.	3330,98	673,35	381,43	101,91	21,15	677,11	3,20	101,65	1			
			Stabw.	532,90	40,90	23,92	6,14	0,52	25,40	0,19	6,08				
			Median	3330,98	673,35	381,43	101,91	21,15	677,11	3,20	101,65				
			95%-Fraktile	3670,12	699,38	396,65	105,82	21,48	693,27	3,32	105,52				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00			
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-20,91	-7,59	-6,83	8,62	-1,40	-2,98	4,77	8,57				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-56,62	-53,02	-45,16	-40,78	-54,65	-53,57	-38,72	-40,79				
19	BR1_BP4_G2_W3_P2_FG	2	Mittelw.	21,83	7,13	83,42	22,46	0,27	7,12	0,77	23,07	1,44			
			Stabw.	0,28	0,27	1,93	0,51	0,02	0,27	0,06	1,10	0,03			
			Median	21,83	7,13	83,42	22,46	0,27	7,12	0,77	23,07				
			95%-Fraktile	22,00	7,29	84,65	22,79	0,28	7,29	0,81	23,77				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	7,16	7,85	-	-	9,30	7,87	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-11,36	-15,31	-	-	-16,36	-15,29	-	-				
20	BR1_BP4_G2_W3_P2_HD	2	Mittelw.	3608,98	937,95	469,24	120,81	26,70	877,41	3,70	120,59	1			
			Stabw.	372,19	54,96	48,56	5,86	1,96	70,95	0,19	5,85				
			Median	3667,84	918,85	471,88	117,51	26,73	883,40	3,60	117,33				
			95%-Fraktile	3920,20	991,81	511,97	126,57	28,46	939,01	3,89	126,34				
			Anzahl	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00		
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (100%)	-19,33	-9,03	-16,50	-4,11	-10,25	-12,12	-2,12	-4,17				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (100%)	-34,60	-47,75	-43,89	-53,18	-54,59	-53,22	-53,80	-53,14				

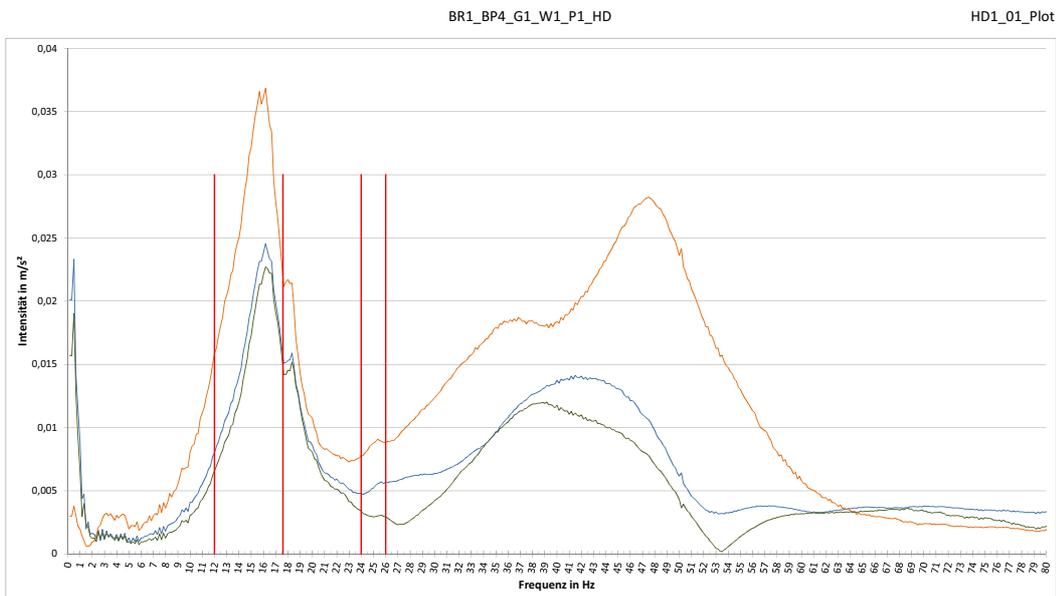
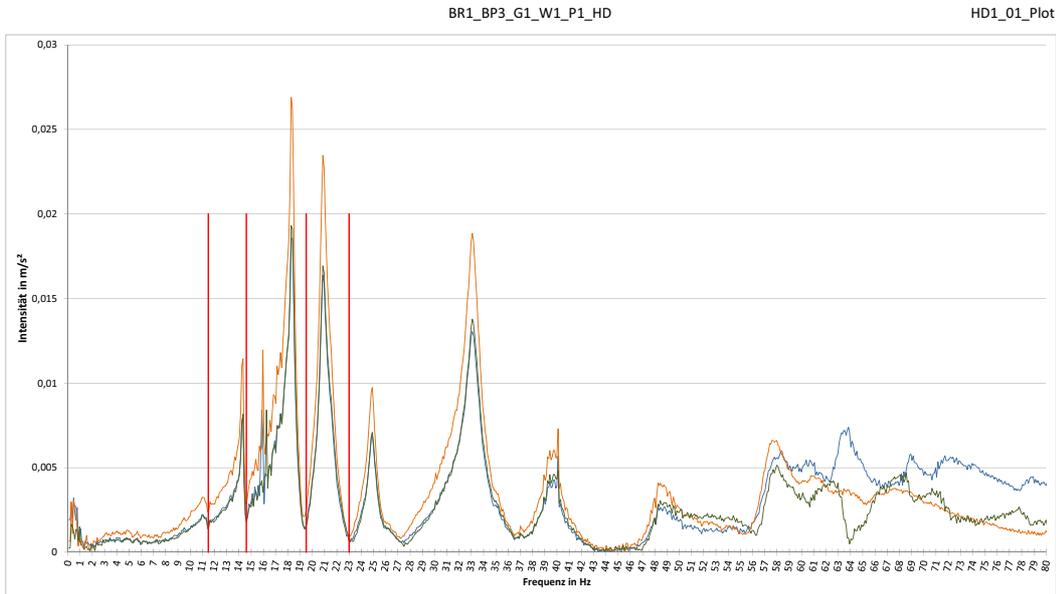
Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schnitthf. (FC) [Hz]	Schnitthf. (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittle,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittle,max		
21	BRT_BP4_G2_W4_P1_FG	2	Mittelw.	26,30	10,11	89,25	27,58	0,36	10,09	0,97	28,64	1,45			
			Stabw.	1,31	0,58	2,53	0,03	0,01	0,57	0,01	0,24	0,05			
			Median	26,30	10,11	89,25	27,58	0,36	10,09	0,97	28,64				
			95%-Fraktil	27,13	10,48	90,86	27,60	0,37	10,46	0,98	28,79				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00			
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	0,15	-5,83	-	-	-3,87	-5,68	-	-	-			
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-4,34	-13,21	-	-	-13,49	-13,24	-	-	-			
			Mittelw.	3070,54	683,17	407,11	132,53	4,19	132,09						
			Stabw.	227,21	65,31	34,74	10,17	0,72	33,71	0,32	10,11				
			Median	3070,54	683,17	407,11	132,53	22,56	728,54	4,19	132,09				
22	BRT_BP4_G2_W4_P1_HD	2	95%-Fraktil	3215,14	724,73	429,22	139,00	23,02	750,00	4,39	138,52				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-10,41	-11,88	-10,49	-10,01	-5,96	-6,54	-9,82	-9,99				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-48,26	-50,56	-37,57	-32,65	-46,91	-47,28	-33,04	-32,66				
			Mittelw.	23,37	7,30	93,20	23,62	0,29	7,29	0,80	23,65	1,42			
			Stabw.	0,58	0,09	7,10	0,82	0,00	0,09	0,01	0,24	0,09			
			Median	23,37	7,30	93,20	23,62	0,29	7,29	0,80	23,65				
			95%-Fraktil	23,74	7,36	97,72	24,14	0,29	7,35	0,81	23,80				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00			
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	2,95	1,57	-	-	0,32	1,59	-	-	-			
23	BRT_BP4_G2_W4_P2_FG	2	rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-1,15	-7,23	-	-	-9,70	-7,20	-	-				
			Mittelw.	3681,48	745,14	443,33	103,52	3,21	103,30						
			Stabw.	1085,93	131,62	125,34	17,69	5,90	208,73	0,49	17,75				
			Median	3681,48	745,14	443,33	103,52	23,83	775,24	3,21	103,30				
			95%-Fraktil	4372,56	828,90	523,10	114,77	27,58	908,07	3,52	114,59				
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-37,70	-28,52	-35,52	-25,07	-31,80	-33,23	-22,63	-25,16				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-42,15	-44,40	-45,04	-49,60	-53,75	-52,84	-49,98	-49,57				

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]						Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]						Schnittrfq. (FG) [Hz]	Schnittrfq. (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	miffl. max	miffl. w,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	miffl. max	miffl. w,max		
25	BR1_BP4_G2_W4_P4_FG	2	Mittelw.	19,35	6,16	79,67	20,39	0,23	6,15	0,68	20,67	1,40					
			Stabw.	2,45	0,54	12,95	2,50	0,01	0,54	0,07	2,21	0,05					
			Median	19,35	6,16	79,67	20,39	0,23	6,15	0,68	20,67						
			95%-Fraktile	20,91	6,51	87,91	21,98	0,24	6,50	0,72	22,08						
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00			
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				34,61	22,97	-	-	18,52	23,03	-	-						
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-20,06	-23,45	-	-	-24,19	-23,46	-	-						
26	BR1_BP4_G2_W4_P4_HD	2	Mittelw.	2955,09	686,16	354,71	94,14	20,48	674,56	3,00	93,96	1					
			Stabw.	597,21	48,91	48,88	2,41	0,78	51,77	0,16	2,48						
			Median	2955,09	686,16	354,71	94,14	20,48	674,56	3,00	93,96						
			95%-Fraktile	3335,16	717,28	385,82	95,68	20,97	707,50	3,11	95,54						
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				-24,48	-12,42	-17,01	-5,08	-8,89	-11,89	-11,30	-5,10						
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-50,02	-52,02	-49,67	-52,43	-56,05	-56,49	-52,34	-52,45						
27	BR1_BP4_G2_W4_P6_FG	2	Mittelw.	23,56	7,64	86,18	23,47	0,28	7,63	0,78	23,76	1,51					
			Stabw.	6,73	1,84	28,26	6,85	0,05	1,83	0,21	6,10	0,10					
			Median	23,56	7,64	86,18	23,47	0,28	7,63	0,78	23,76						
			95%-Fraktile	27,84	8,81	104,16	27,82	0,31	8,80	0,91	27,64						
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				29,54	24,26	-	-	14,95	24,27	-	-						
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				4,73	-5,87	-	-	-3,76	-5,87	-	-						
28	BR1_BP4_G2_W4_P6_HD	2	Mittelw.	2866,85	683,75	344,00	98,18	20,17	648,57	3,06	97,91	1					
			Stabw.	58,47	20,45	5,43	2,85	2,17	74,47	0,07	2,87						
			Median	2866,85	683,75	344,00	98,18	20,17	648,57	3,06	97,91						
			95%-Fraktile	2904,06	696,76	347,45	99,99	21,55	695,98	3,10	99,74						
			Anzahl	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)				7,72	6,96	5,34	5,99	15,29	17,51	-3,65	6,06						
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)				-40,35	-46,97	-38,99	-45,24	-48,14	-47,00	-45,00	-45,22						

Nr.	Schwingungsgrößen	Anzahl VP	Ausgabewert	Schwingbeschleunigung M2 [mm/s <sup>2</sup> ]					Schwinggeschwindigkeit M2 [mm/s]					Schriftfreq. (FG) [Hz]	Zeitraum (HD) [s]
				max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittle,max	max	w,max	r.m.s.	w,r.m.s.	mittle,max		
29	BR2_BP4_G1_W1_P1_FG	2	Mittelw.	20,97	7,69	73,12	22,03	0,48	7,67	0,97	22,83	1,48			
			Stabw.	2,09	0,95	5,96	1,82	0,42	0,94	0,41	1,84	0,09			
			Median	20,22	7,72	73,23	21,55	0,28	7,70	0,80	22,41				
			95%-Fraktile	23,48	8,59	79,34	24,17	0,98	8,57	1,46	24,99				
			Anzahl	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	11,88	10,21	-	-	-1,62	10,08	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	1,21	-6,30	-	-	3,08	-6,30	-	-				
			Mittelw.	2540,31	582,60	380,53	109,54	19,78	637,59	3,38	109,25				
			Stabw.	315,98	69,50	27,93	9,67	1,17	42,22	0,30	9,60				
			Median	2493,57	593,75	379,37	113,44	19,53	627,34	3,50	113,12				
95%-Fraktile	2899,25	645,26	410,67	115,86	21,15	687,59	3,57	115,51							
Anzahl	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00							
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-15,03	-7,44	-0,17	3,98	5,88	6,31	1,45	3,99							
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-47,52	-45,52	-41,20	-39,83	-47,41	-46,50	-38,55	-39,81							
31	BR2_BP4_G1_W1_P5_FG	2	Mittelw.	27,04	10,63	94,33	29,07	0,37	10,61	1,01	30,04	1,50			
			Stabw.	6,79	2,82	17,98	6,06	0,09	2,81	0,18	5,88	0,09			
			Median	26,35	10,15	95,43	28,64	0,36	10,14	0,99	29,51				
			95%-Fraktile	34,31	13,66	112,27	35,45	0,47	13,63	1,20	36,12				
			Anzahl	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00				
			rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-26,13	-35,97	-	-	-34,02	-35,97	-	-				
			rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-6,80	-13,89	-	-	-13,55	-13,87	-	-				
			Mittelw.	2502,15	512,81	308,54	89,75	17,02	537,83	2,86	89,46				
			Stabw.	643,77	114,06	65,41	14,19	2,23	72,70	0,46	14,14				
			Median	2708,88	558,86	336,40	96,54	17,73	559,90	3,08	96,23				
95%-Fraktile	2986,83	585,86	349,23	97,35	18,70	593,22	3,11	97,03							
Anzahl	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00							
rel. Abweichung von VP3 zu VP1 (Bezugsb.)	-47,54	-41,13	-36,56	-28,76	-26,26	-25,73	-30,77	-28,76							
rel. Abweichung von M1, M3 zu M2 (Bezugsb.)	-50,95	-46,78	-41,26	-34,54	-50,29	-50,93	-33,36	-34,57							

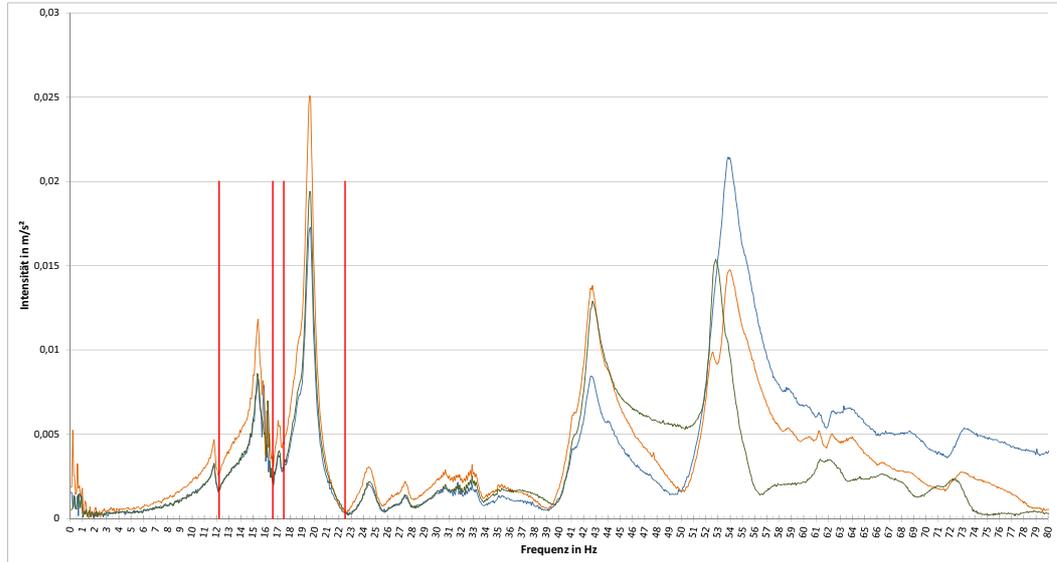
### 4.3 Frequenzspektren

Während der Messungen befand sich die anregende Versuchsperson auf der Platte.



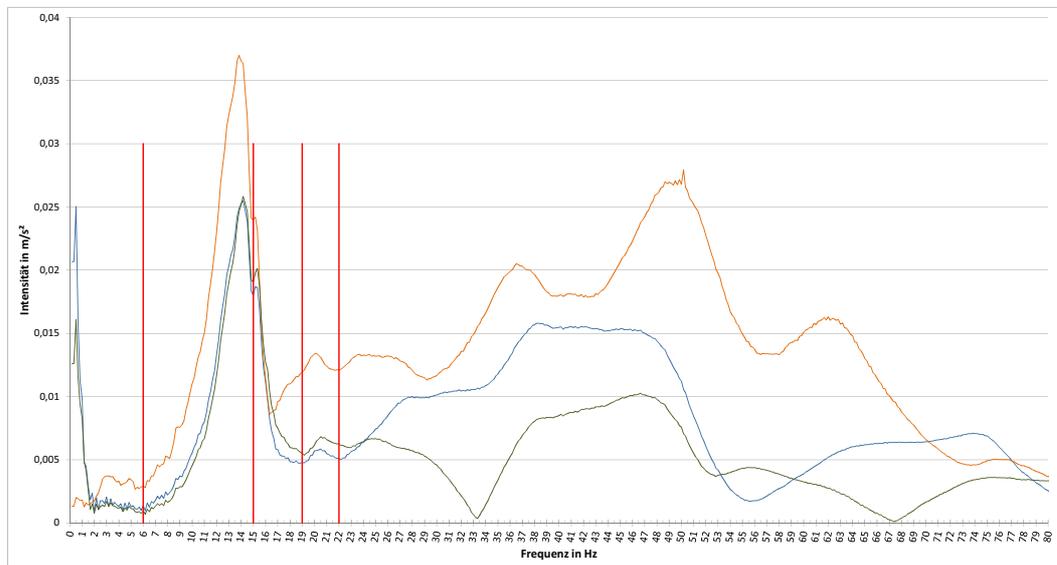
BR1\_BP3\_G1\_W3\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



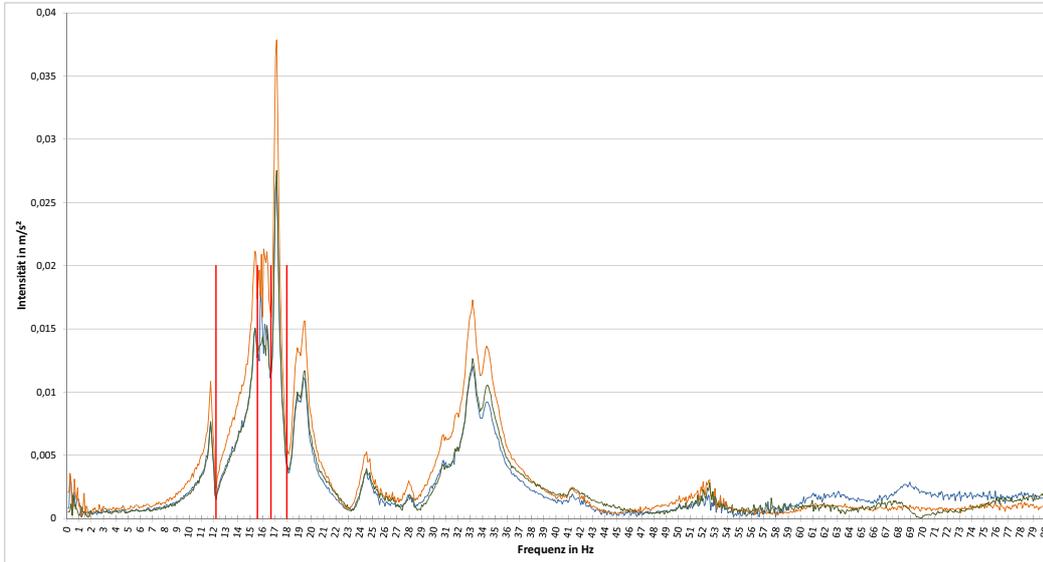
BR1\_BP4\_G1\_W3\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



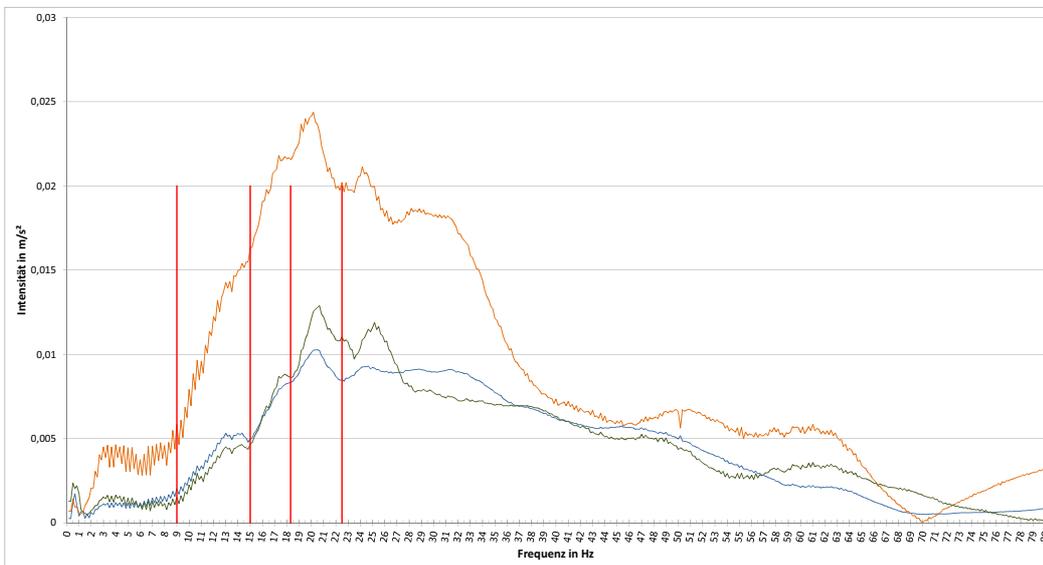
BR1\_BP3\_G1\_W3\_P2\_HD

HD1\_02\_Plot



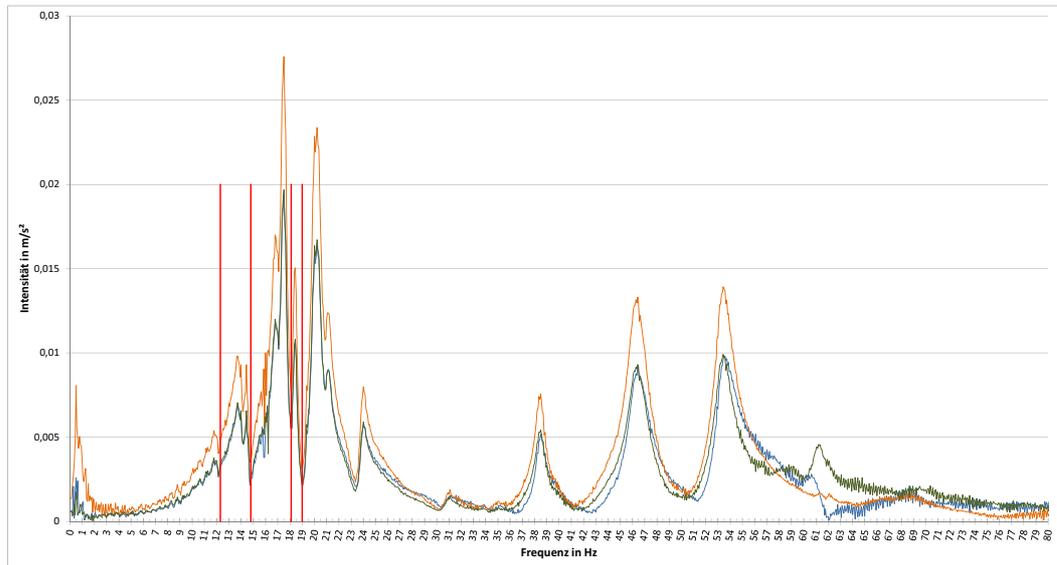
BR1\_BP4\_G1\_W3\_P2\_HD

HD1\_01\_Plot



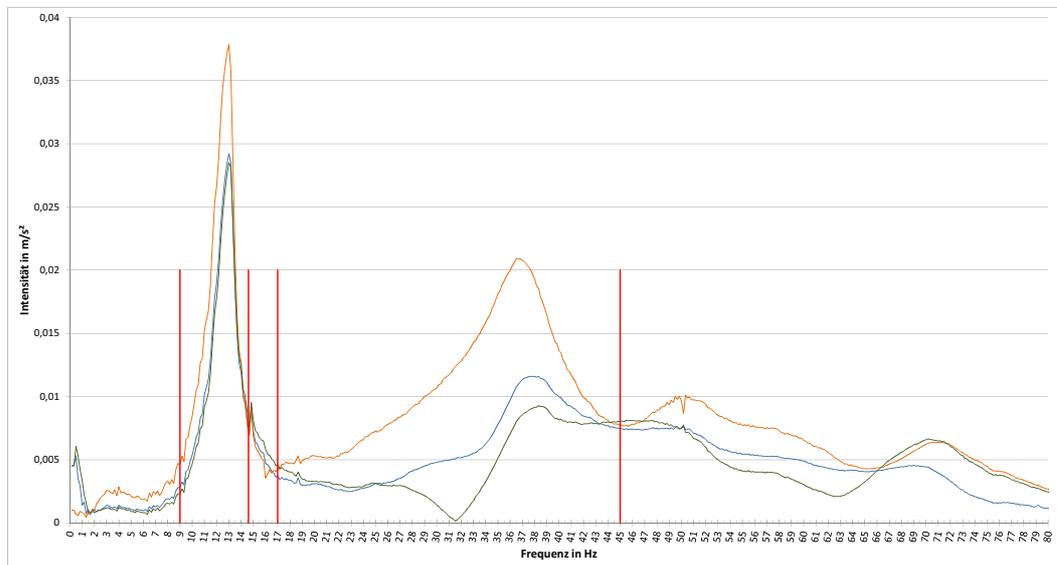
BR1\_BP3\_G1\_W4\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



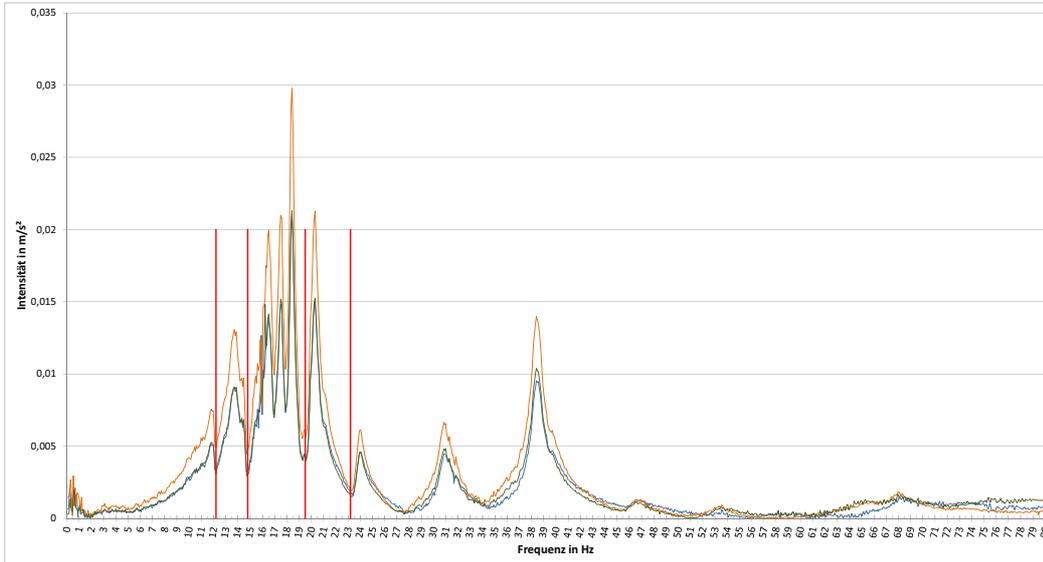
BR1\_BP4\_G1\_W4\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



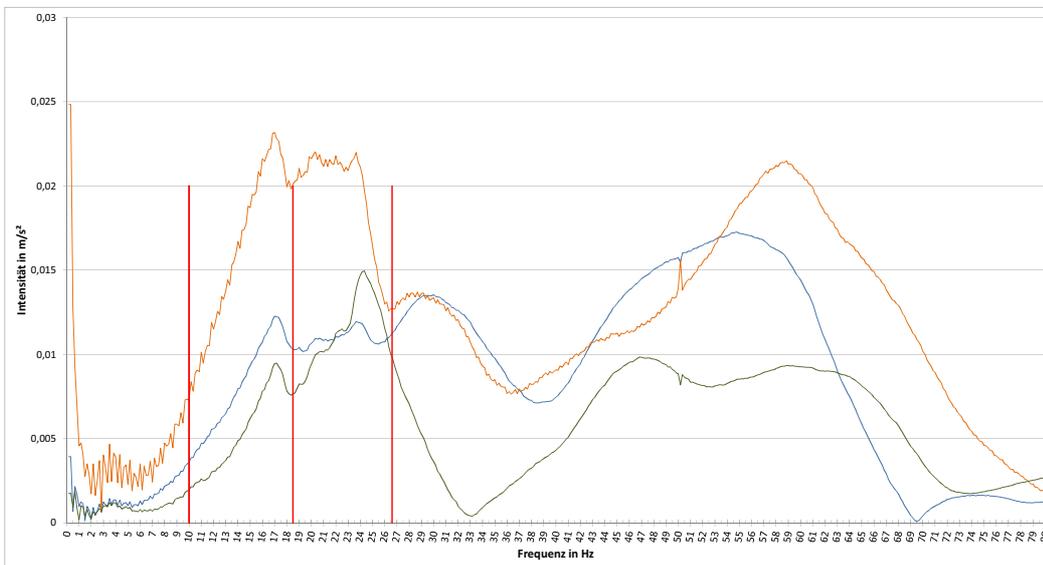
BR1\_BP3\_G1\_W4\_P2\_HD

HD1\_01\_Plot



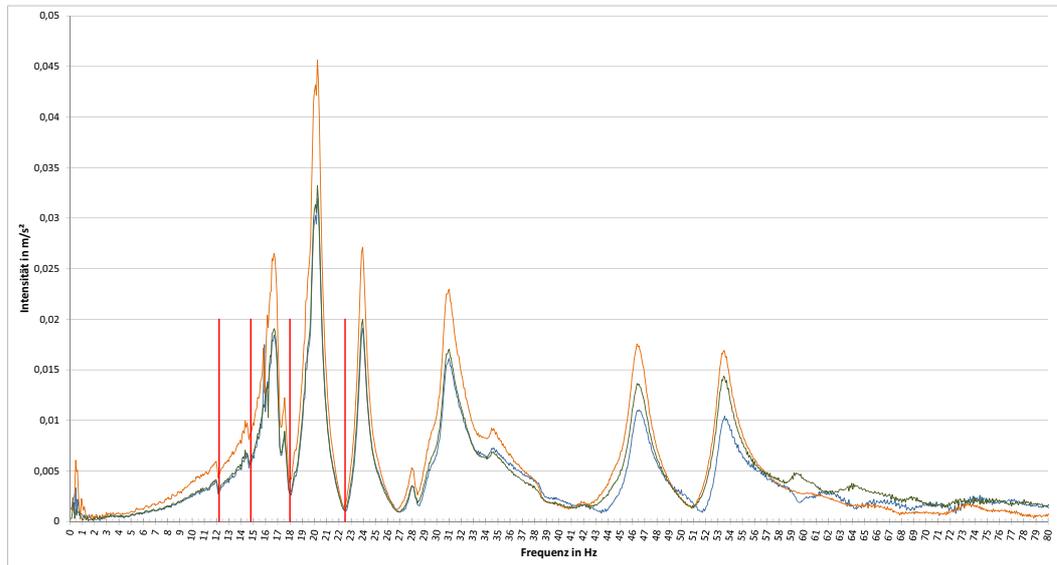
BR1\_BP4\_G1\_W4\_P2\_HD

HD1\_01\_Plot



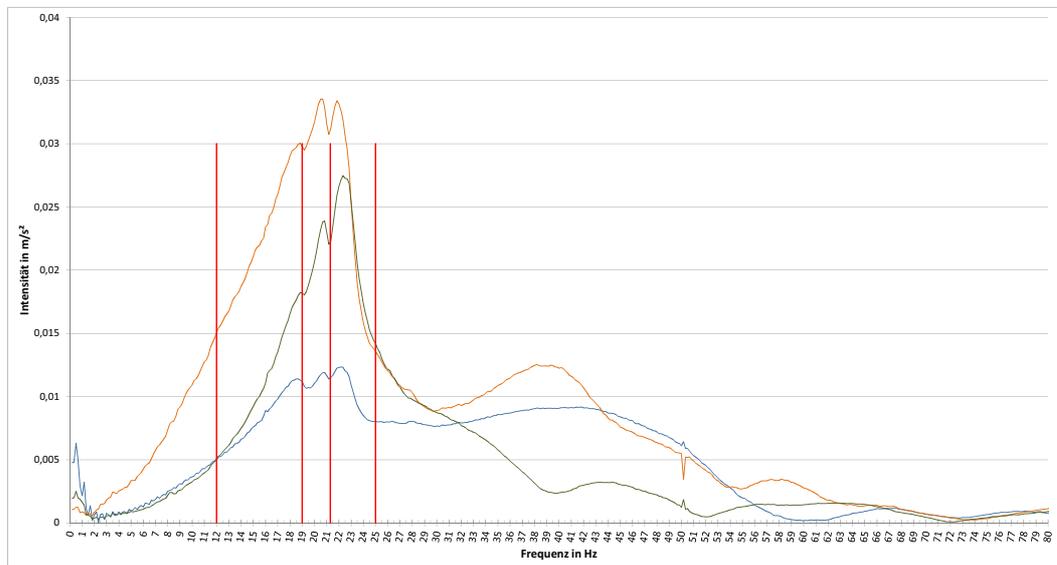
BR1\_BP3\_G1\_W4\_P4\_HD

HD1\_01\_Plot



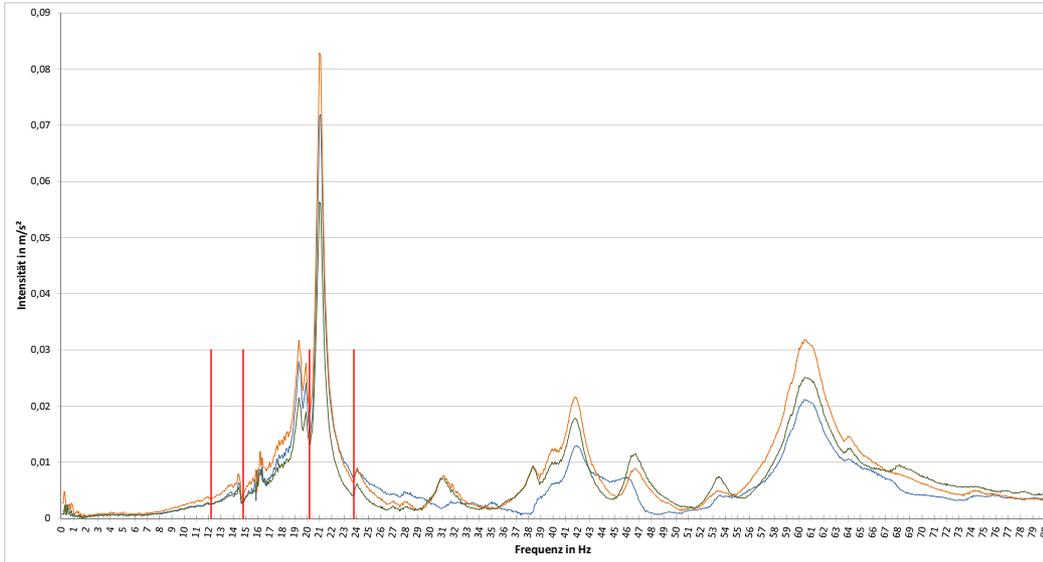
BR1\_BP4\_G1\_W4\_P4\_HD

HD1\_01\_Plot



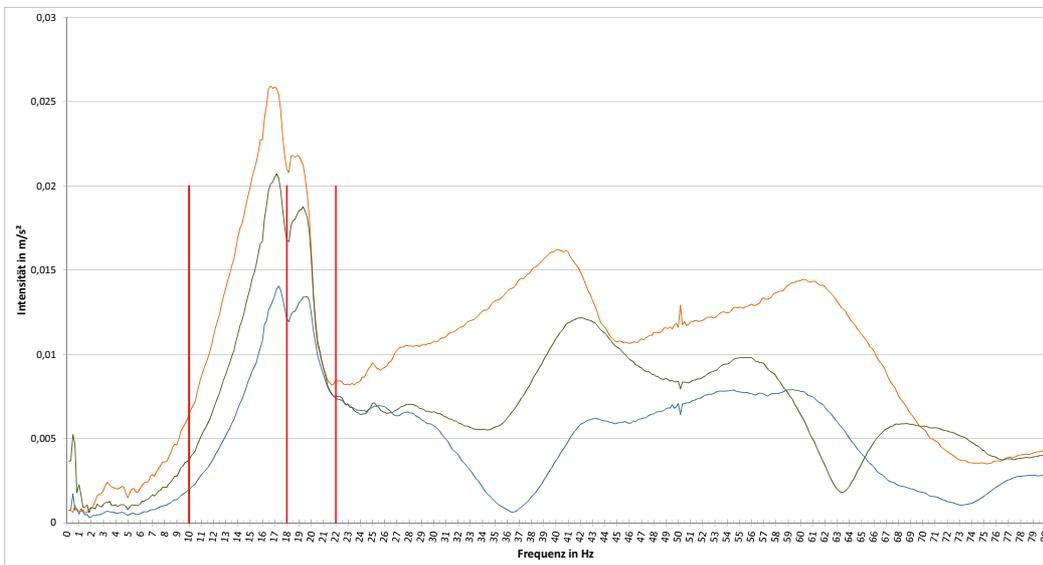
BR1\_BP3\_G1\_W4\_P6\_HD

HD1\_01\_Plot



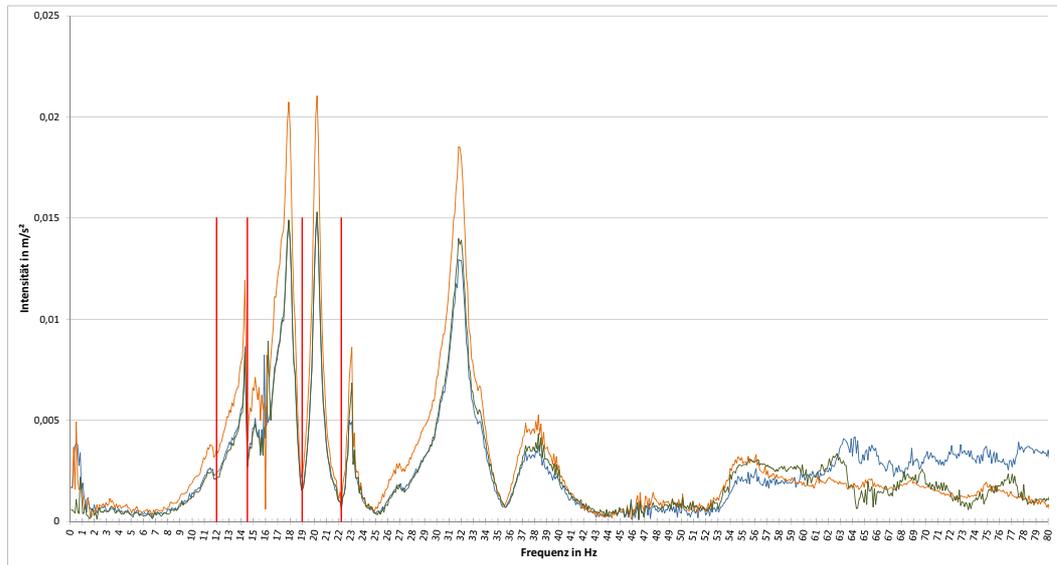
BR1\_BP4\_G1\_W4\_P6\_HD

HD1\_01\_Plot



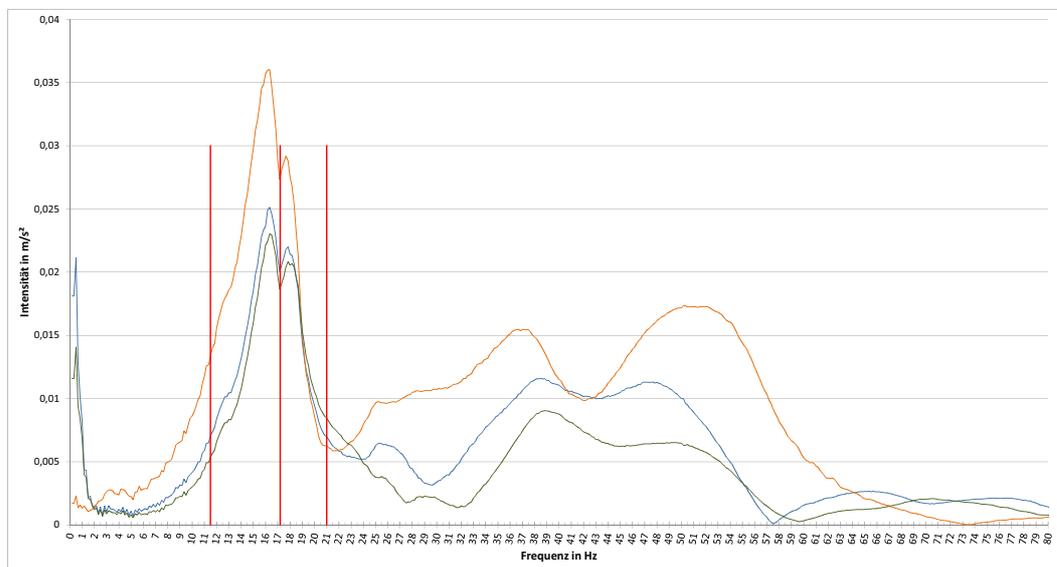
BR1\_BP3\_G2\_W1\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



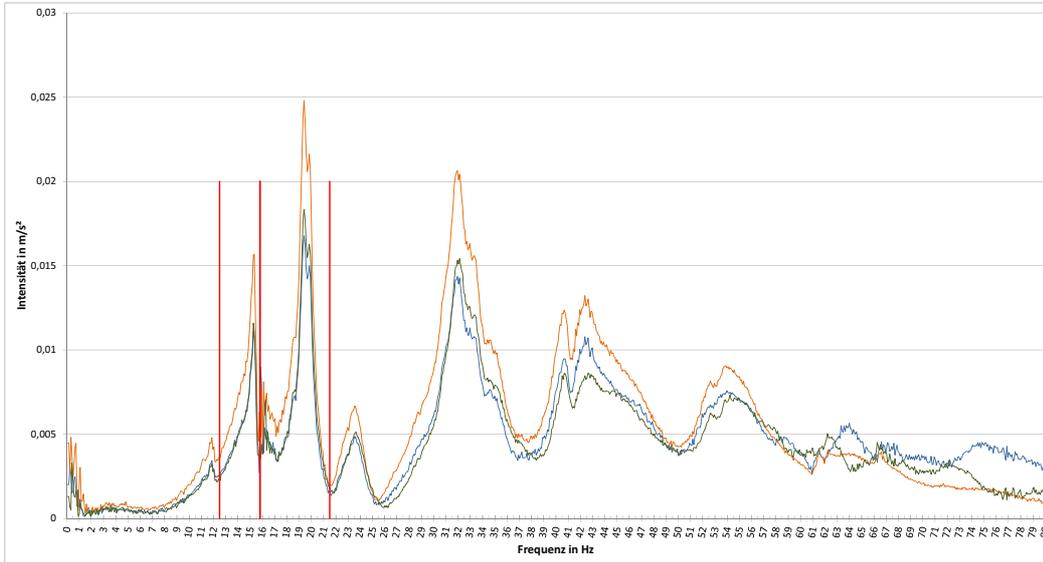
BR1\_BP4\_G2\_W1\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



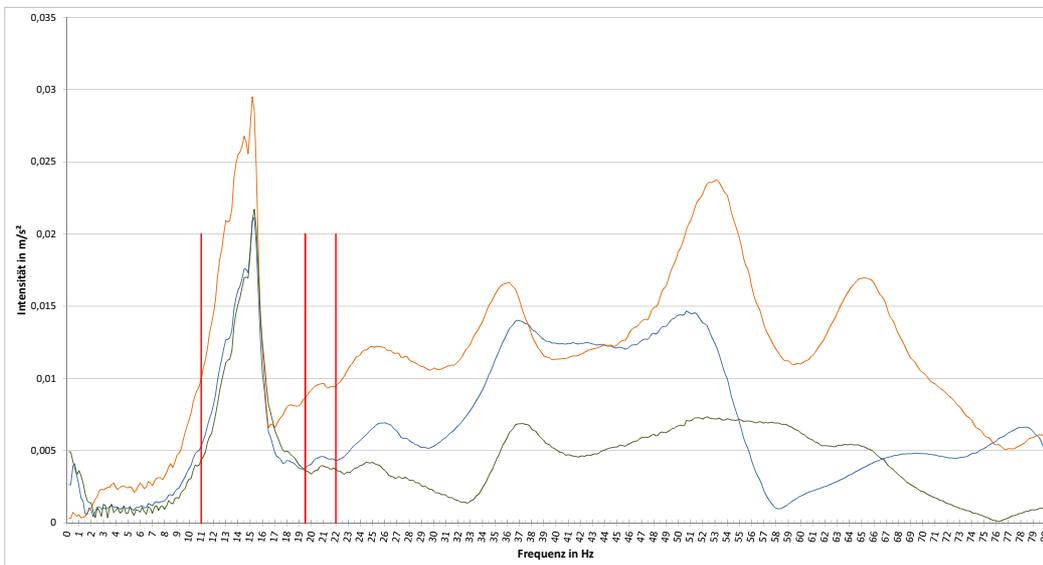
BR1\_BP3\_G2\_W3\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



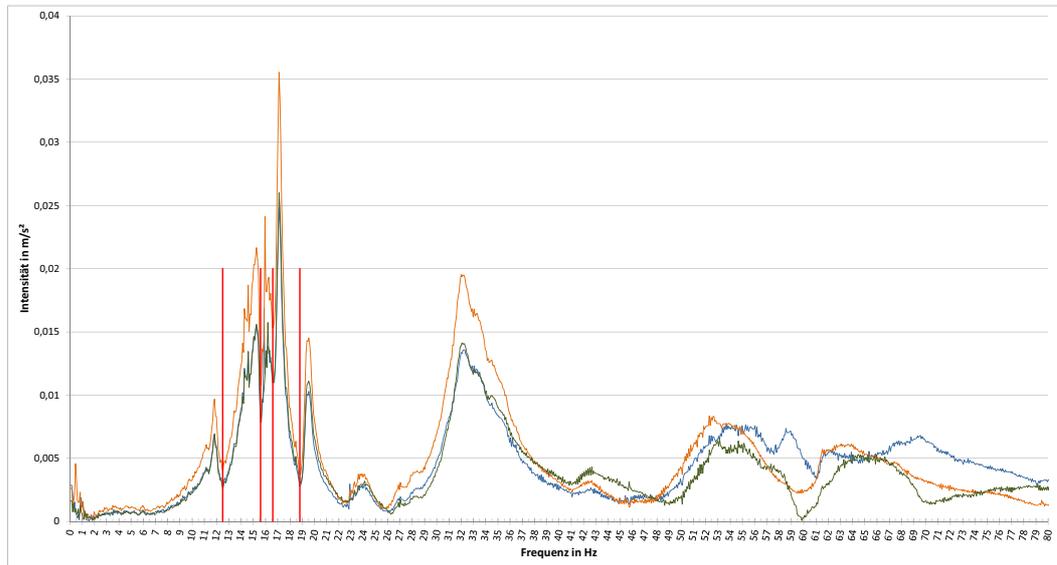
BR1\_BP4\_G2\_W3\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



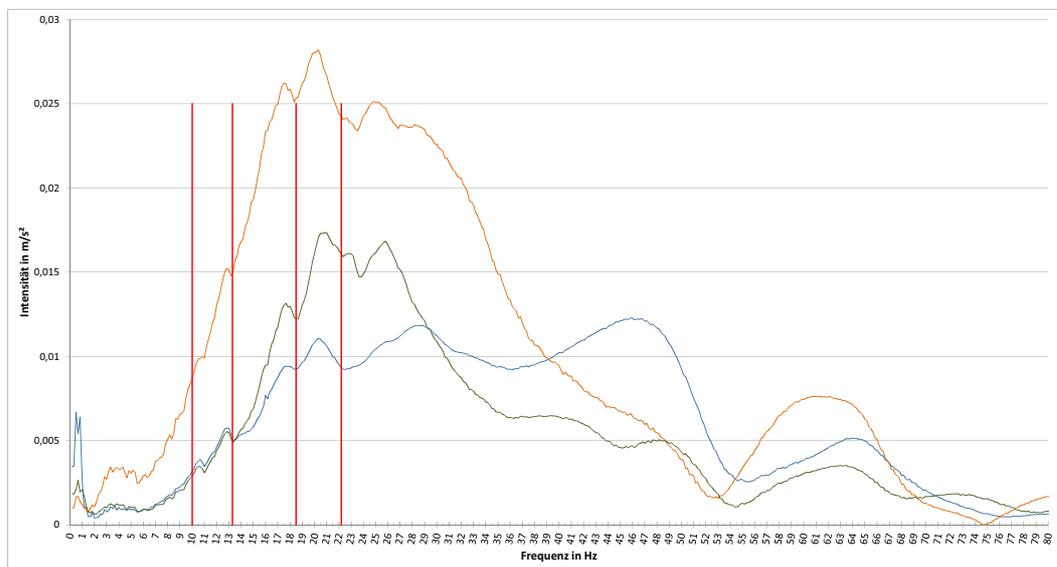
BR1\_BP3\_G2\_W3\_P2\_HD

HD1\_01\_Plot



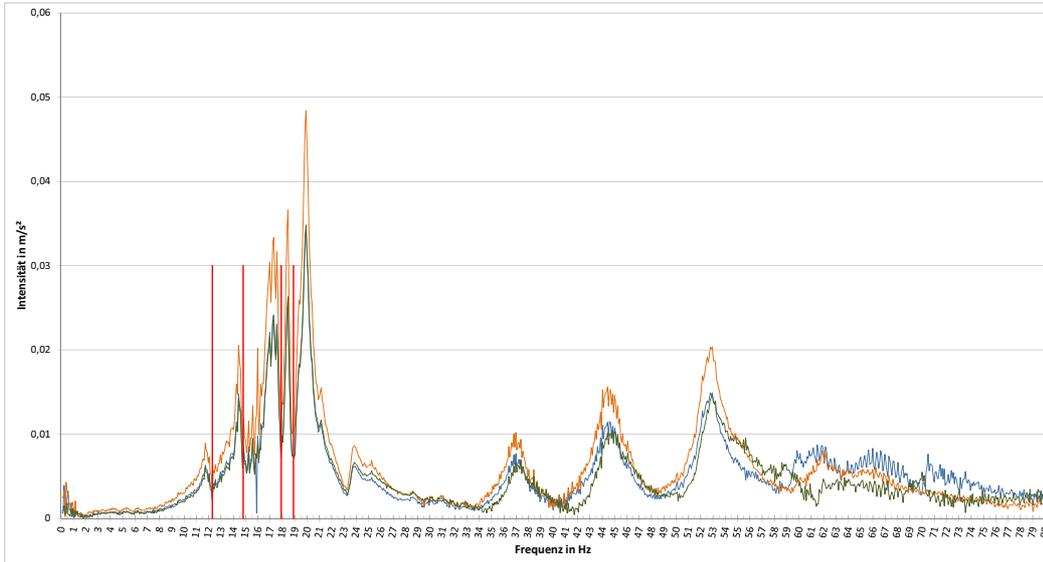
BR1\_BP4\_G2\_W3\_P2\_HD

HD1\_01\_Plot



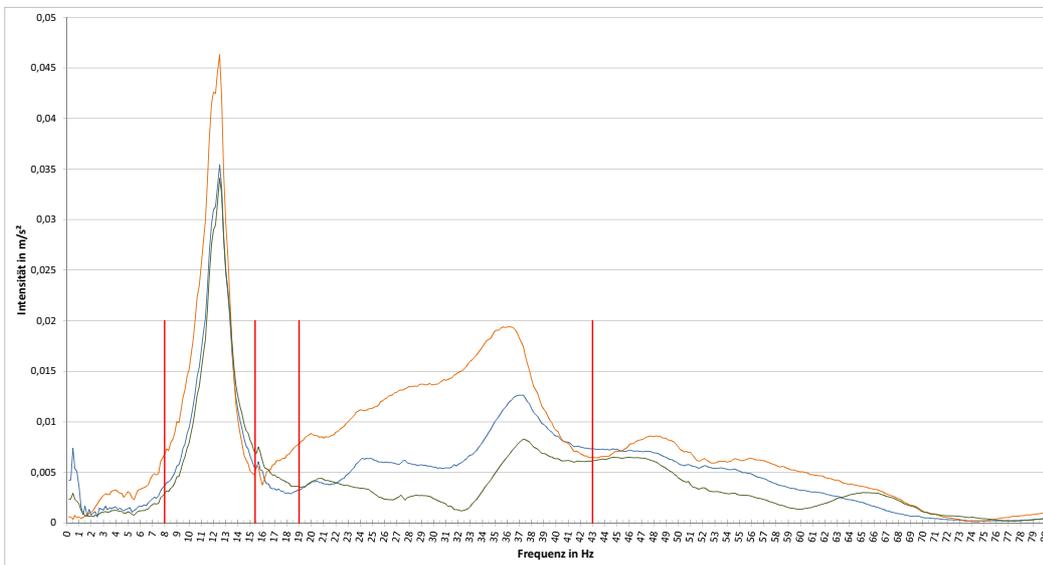
BR1\_BP3\_G2\_W4\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



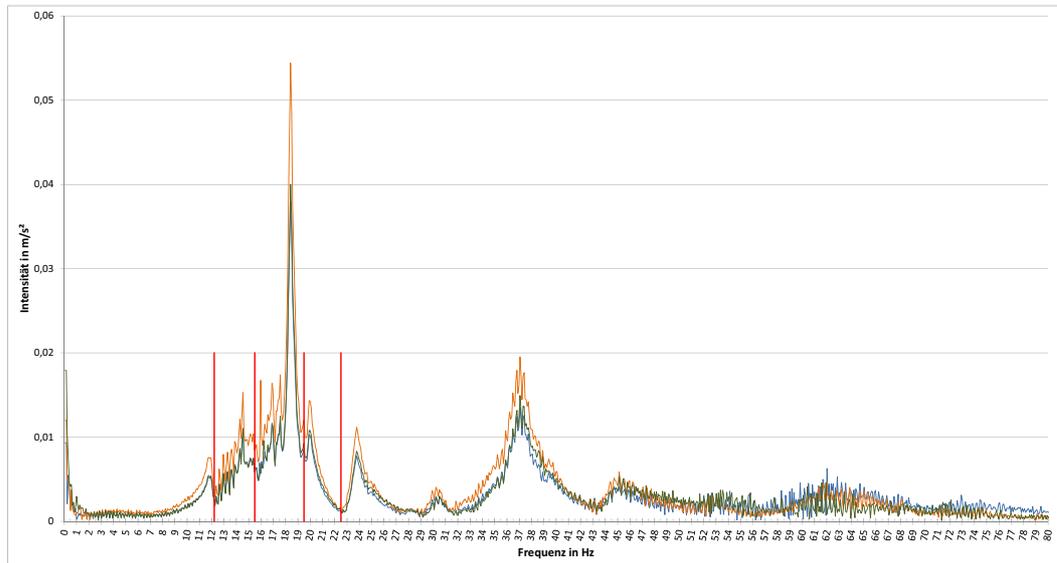
BR1\_BP4\_G2\_W4\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



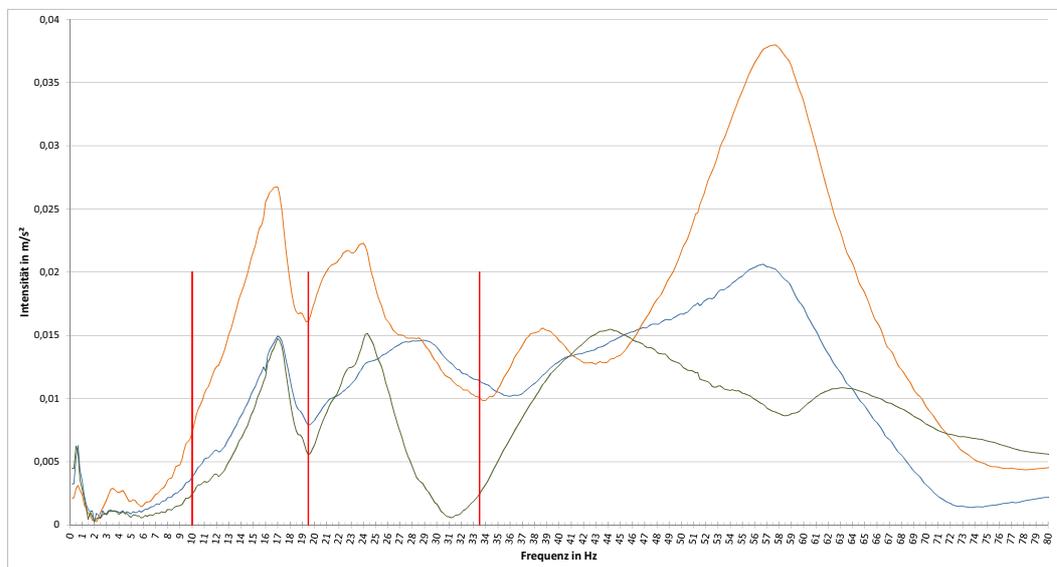
BR1\_BP3\_G2\_W4\_P2\_HD

HD1\_01\_Plot



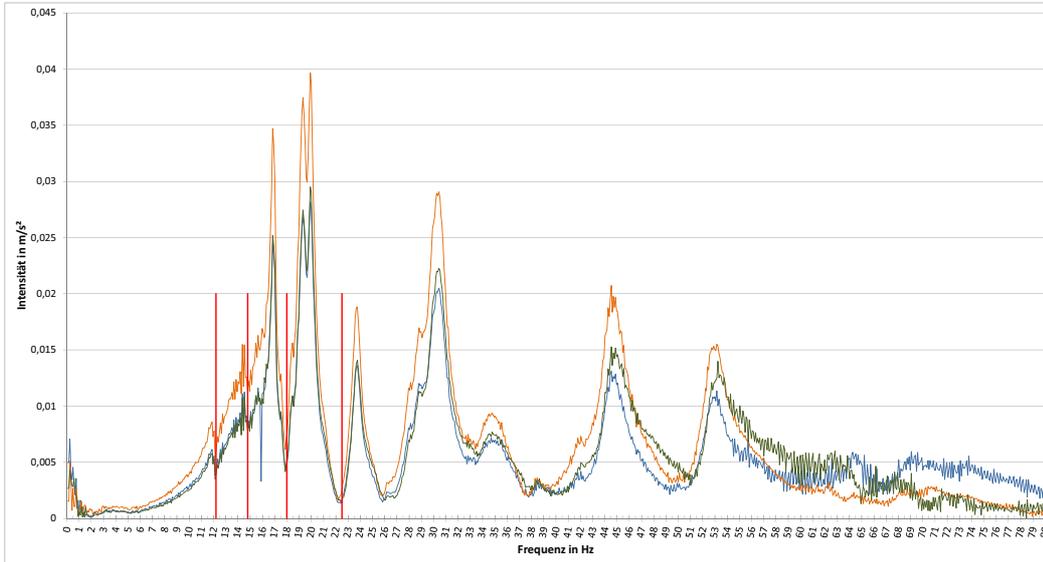
BR1\_BP4\_G2\_W4\_P2\_HD

HD1\_01\_Plot



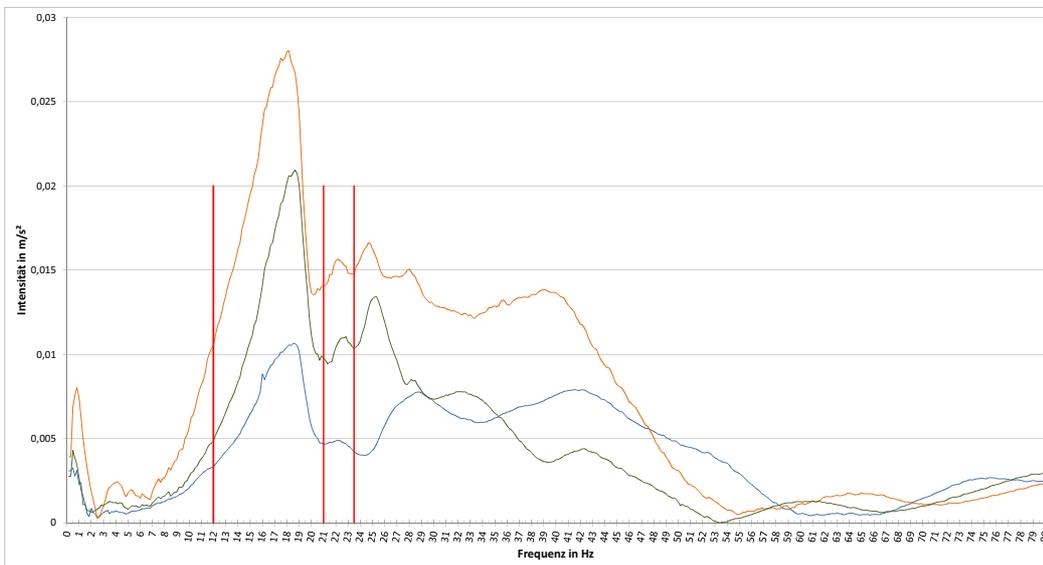
BR1\_BP3\_G2\_W4\_P4\_HD

HD1\_01\_Plot



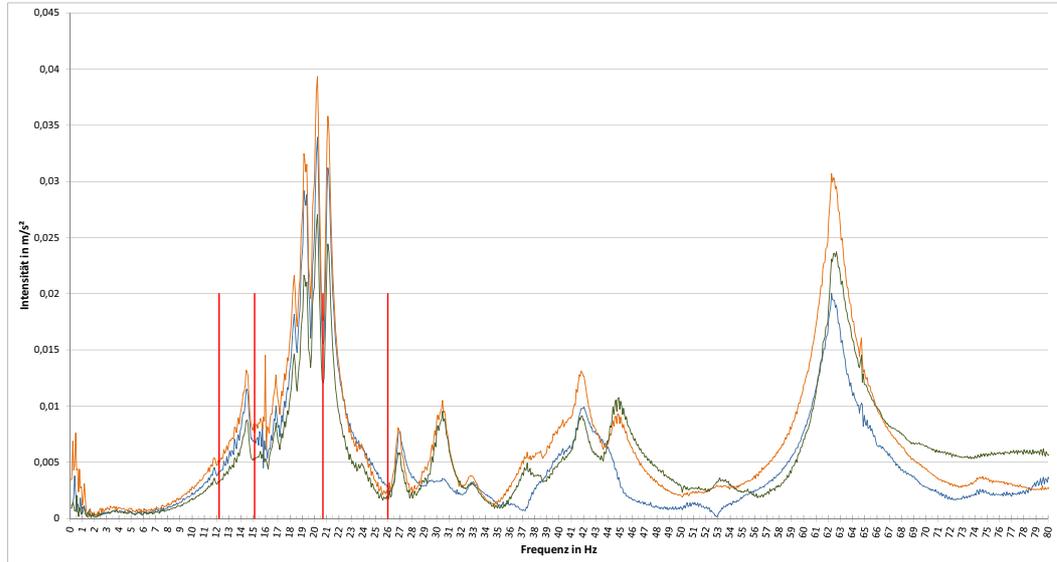
BR1\_BP4\_G2\_W4\_P4\_HD

HD1\_01\_Plot



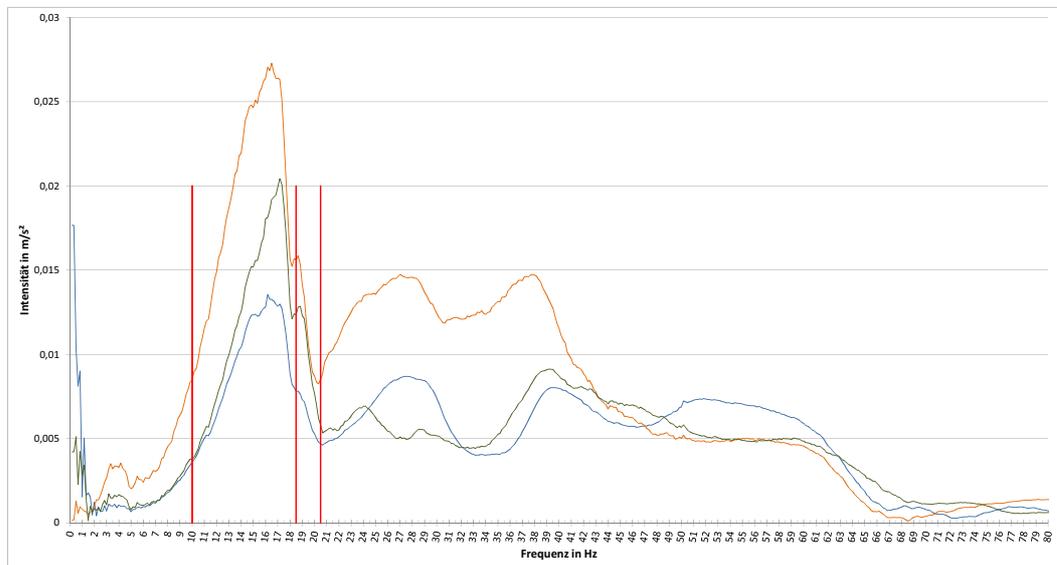
BR1\_BP3\_G2\_W4\_P6\_HD

HD1\_01\_Plot



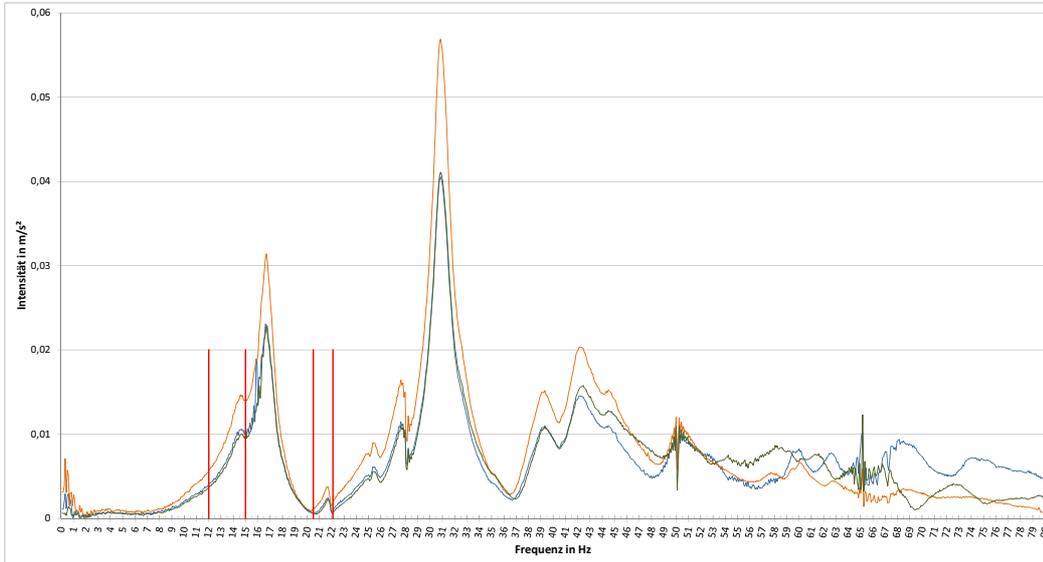
BR1\_BP4\_G2\_W4\_P6\_HD

HD1\_01\_Plot



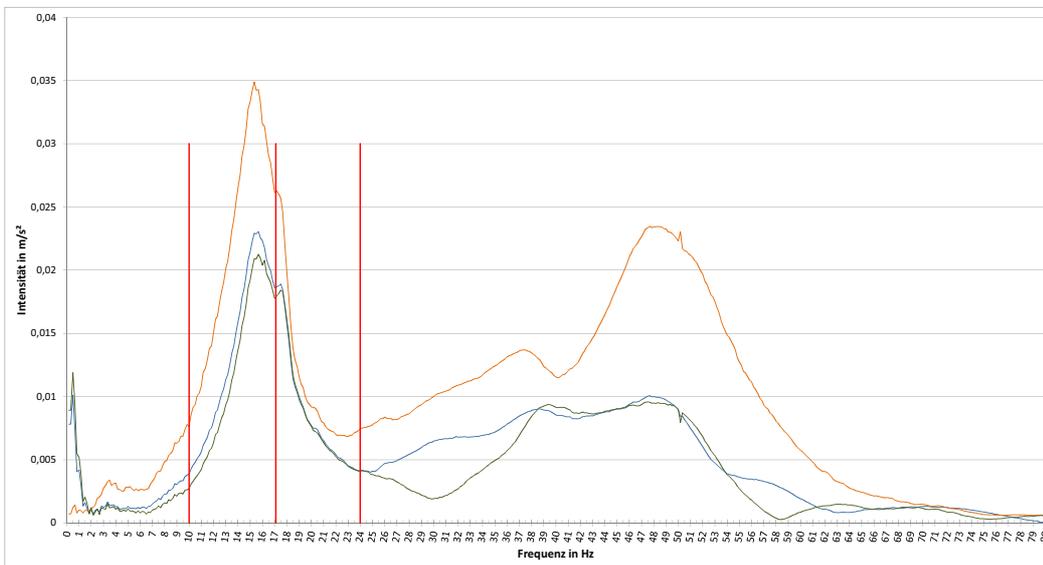
BR2\_BP2\_G1\_W1\_P1\_HD

HD1\_01\_Plot



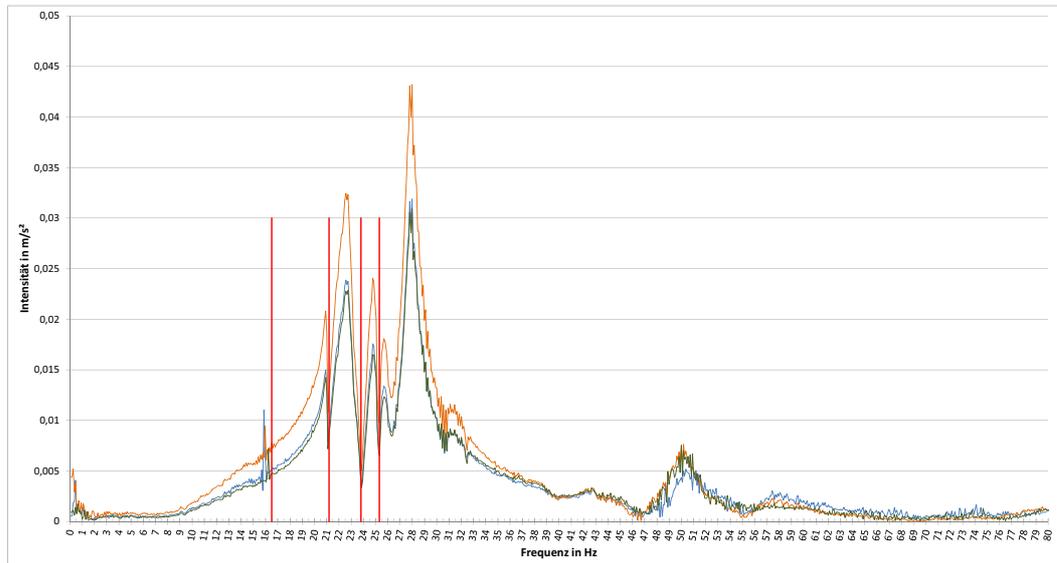
BR2\_BP4\_G1\_W1\_P1\_HD

HD1\_02\_Plot



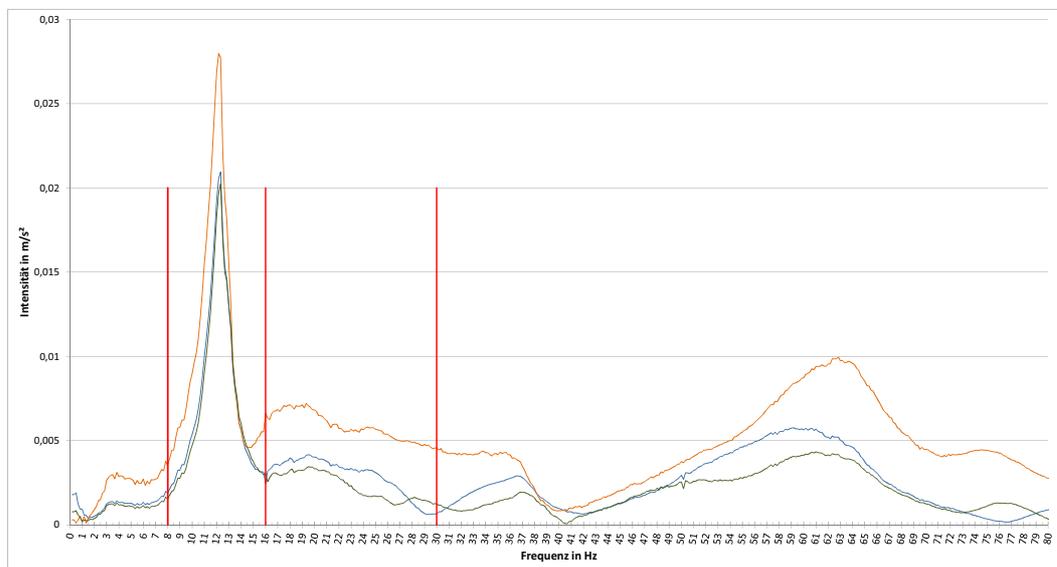
BR2\_BP2\_G1\_W1\_P5\_HD

HD1\_O2\_Plot



BR2\_BP4\_G1\_W1\_P5\_HD

HD1\_O2\_Plot



## 4. 4 Eigenfrequenzen Rohbauphasen

Während der Messungen befand sich die anregende Versuchsperson auf der Platte.

Z	Eigenfrequenzen	Mittelwerte der Eigenfrequenzen [Hz]						
		f <sub>0</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>
1a	BR1 BP3 G1 W1 P1 FG1 01		14,24	18,33	20,88	24,82		
1b	BR1 BP3 G1 W1 P1 FG1 02		14,26	18,28	20,68	25,00		
1c	BR1 BP3 G1 W1 P1 FG2 01		14,11	18,35	21,16	25,04		
1d	BR1 BP3 G1 W1 P1 FG2 02		14,30	18,31	20,81	24,97		
1e	BR1 BP3 G1 W1 P1 FG3 01		14,34	18,46	21,08	24,70		
1f	BR1 BP3 G1 W1 P1 FG3 02		14,28	18,32	20,84	24,89		
<b>1</b>	<b>BR1 BP3 G1 W1 P1 FG</b>		<b>14,26</b>	<b>18,34</b>	<b>20,91</b>	<b>24,90</b>		
2a	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD1 01	10,86	14,33	18,27	20,86	24,81		
2b	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD1 02	10,91	14,30	18,35	20,91	24,88		
2c	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD1 03	11,00	14,25	18,33	20,83	24,83		
2d	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD2 01	-	14,34	18,32	20,89	24,87		
2e	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD2 02	-	14,31	18,33	20,88	24,90		
2f	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD2 03	-	14,34	18,29	21,32	25,00		
2g	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD3 01	-	14,33	18,28	20,90	24,78		
2h	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD3 02	10,91	14,32	18,33	20,83	24,93		
2i	BR1 BP3 G1 W1 P1 HD3 03	-	14,32	18,29	20,93	24,86		
<b>2</b>	<b>BR1 BP3 G1 W1 P1 HD</b>	<b>10,92</b>	<b>14,32</b>	<b>18,31</b>	<b>20,93</b>	<b>24,87</b>		
	<b>BR1 BP3 G1 W1 P1</b>	<b>10,92</b>	<b>14,29</b>	<b>18,32</b>	<b>20,92</b>	<b>24,89</b>		
3a	BR1 BP3 G1 W3 P1 FG1 01	11,75	15,32	16,95	19,38	24,71		
3b	BR1 BP3 G1 W3 P1 FG3 01		15,58	17,12	19,78	24,60		
<b>3</b>	<b>BR1 BP3 G1 W3 P1 FG</b>	<b>11,75</b>	<b>15,45</b>	<b>17,04</b>	<b>19,58</b>	<b>24,66</b>		
4a	BR1 BP3 G1 W3 P1 HD1 01	11,80	15,37	17,06	19,64	24,30		
4b	BR1 BP3 G1 W3 P1 HD1 02	11,73	15,40	17,08	19,67	24,30		
4c	BR1 BP3 G1 W3 P1 HD3 01	11,64	15,76	16,95	19,61	24,45		
<b>4</b>	<b>BR1 BP3 G1 W3 P1 HD</b>	<b>11,72</b>	<b>15,51</b>	<b>17,03</b>	<b>19,64</b>	<b>24,35</b>		
	<b>BR1 BP3 G1 W3 P1</b>	<b>11,73</b>	<b>15,49</b>	<b>17,03</b>	<b>19,62</b>	<b>24,47</b>		
5a	BR1 BP3 G1 W3 P2 FG1 01	11,80	15,24	16,22	16,88	19,40	24,29	
5b	BR1 BP3 G1 W3 P2 FG3 01	11,74	-	16,03	17,12	19,12	24,46	
<b>5</b>	<b>BR1 BP3 G1 W3 P2 FG</b>	<b>11,77</b>	<b>15,24</b>	<b>16,13</b>	<b>17,00</b>	<b>19,26</b>	<b>24,38</b>	
6a	BR1 BP3 G1 W3 P2 HD1 01	11,81	15,35	16,04	17,09	19,45	24,49	
6c	BR1 BP3 G1 W3 P2 HD1 02	11,77	15,40	16,11	17,17	19,38	24,51	
6d	BR1 BP3 G1 W3 P2 HD3 01	11,78	15,42	16,20	17,20	19,44	24,30	
6e	BR1 BP3 G1 W3 P2 HD3 02	11,80	15,44	16,07	17,21	19,46	24,32	
<b>6</b>	<b>BR1 BP3 G1 W3 P2 HD</b>	<b>11,79</b>	<b>15,40</b>	<b>16,11</b>	<b>17,17</b>	<b>19,43</b>	<b>24,41</b>	
	<b>BR1 BP3 G1 W3 P2</b>	<b>11,78</b>	<b>15,37</b>	<b>16,11</b>	<b>17,11</b>	<b>19,38</b>	<b>24,40</b>	
7a	BR1 BP3 G1 W4 P1 FG1 01	11,78	14,11	-	17,14	18,52	20,29	24,54
7b	BR1 BP3 G1 W4 P1 FG3 01	-	13,85	-	17,52	18,33	20,24	23,88
<b>7</b>	<b>BR1 BP3 G1 W4 P1 FG</b>	<b>11,78</b>	<b>13,98</b>		<b>17,33</b>	<b>18,43</b>	<b>20,27</b>	<b>24,21</b>
8a	BR1 BP3 G1 W4 P1 HD1 01	11,79	13,71	16,79	17,50	18,43	20,21	24,00
8b	BR1 BP3 G1 W4 P1 HD3 01	11,78	13,70	16,89	17,48	18,37	20,22	24,00
<b>8</b>	<b>BR1 BP3 G1 W4 P1 HD</b>	<b>11,79</b>	<b>13,71</b>	<b>16,84</b>	<b>17,49</b>	<b>18,40</b>	<b>20,22</b>	<b>24,00</b>
	<b>BR1 BP3 G1 W4 P1</b>	<b>11,78</b>	<b>13,84</b>	<b>16,84</b>	<b>17,41</b>	<b>18,41</b>	<b>20,24</b>	<b>24,11</b>

Z	Eigenfrequenzen	Mittelwerte der Eigenfrequenzen [Hz]						
		f <sub>0</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>
9a	BR1 BP3 G1 W4 P2 FG1 01	11,85	13,67	16,57	17,51	18,36	20,24	23,76
9b	BR1 BP3 G1 W4 P2 FG3 01	-	13,54	16,38	17,25	18,55	20,26	23,86
<b>9</b>	<b>BR1 BP3 G1 W4 P2 FG</b>	<b>11,85</b>	<b>13,61</b>	<b>16,48</b>	<b>17,38</b>	<b>18,46</b>	<b>20,25</b>	<b>23,81</b>
10a	BR1 BP3 G1 W4 P2 HD1 01	11,74	13,71	16,52	17,50	18,41	20,30	23,94
10b	BR1 BP3 G1 W4 P2 HD3 01	11,87	13,81	16,47	17,48	18,42	20,22	23,96
<b>10</b>	<b>BR1 BP3 G1 W4 P2 HD</b>	<b>11,81</b>	<b>13,76</b>	<b>16,50</b>	<b>17,49</b>	<b>18,42</b>	<b>20,26</b>	<b>23,95</b>
	<b>BR1 BP3 G1 W4 P2</b>	<b>11,82</b>	<b>13,68</b>	<b>16,49</b>	<b>17,44</b>	<b>18,44</b>	<b>20,26</b>	<b>23,88</b>
11a	BR1 BP3 G1 W4 P4 FG1 01		14,52	16,62	-	-	20,19	23,98
11b	BR1 BP3 G1 W4 P4 FG3 01		14,33	16,38	-	-	20,14	23,82
<b>11</b>	<b>BR1 BP3 G1 W4 P4 FG</b>		<b>14,43</b>	<b>16,50</b>			<b>20,17</b>	<b>23,90</b>
12a	BR1 BP3 G1 W4 P4 HD1 01	11,73	14,33	16,69	17,56	-	20,24	23,86
12b	BR1 BP3 G1 W4 P4 HD3 01	11,81	14,50	16,24	17,52	-	19,86	23,82
<b>12</b>	<b>BR1 BP3 G1 W4 P4 HD</b>	<b>11,77</b>	<b>14,42</b>	<b>16,47</b>	<b>17,54</b>		<b>20,05</b>	<b>23,84</b>
	<b>BR1 BP3 G1 W4 P4</b>	<b>11,77</b>	<b>14,42</b>	<b>16,48</b>	<b>17,54</b>		<b>20,11</b>	<b>23,87</b>
13a	BR1 BP3 G1 W4 P6 FG1 01			18,91	-	21,18	-	
13b	BR1 BP3 G1 W4 P6 FG1 02			19,04	19,78	20,93	24,10	
13c	BR1 BP3 G1 W4 P6 FG3 01			-	19,84	21,36	23,24	
13d	BR1 BP3 G1 W4 P6 FG3 02			19,20	19,91	20,89	24,01	
<b>13</b>	<b>BR1 BP3 G1 W4 P6 FG</b>			<b>19,05</b>	<b>19,84</b>	<b>21,09</b>	<b>23,78</b>	
14a	BR1 BP3 G1 W4 P6 HD1 01		14,44	19,32	19,92	21,05	23,98	
14b	BR1 BP3 G1 W4 P6 HD1 02		14,44	19,42	19,92	21,00	24,00	
14c	BR1 BP3 G1 W4 P6 HD3 01		14,36	19,45	19,91	21,00	24,00	
14d	BR1 BP3 G1 W4 P6 HD3 02		14,44	19,32	19,91	21,03	24,10	
<b>14</b>	<b>BR1 BP3 G1 W4 P6 HD</b>		<b>14,42</b>	<b>19,38</b>	<b>19,92</b>	<b>21,02</b>	<b>24,02</b>	
	<b>BR1 BP3 G1 W4 P6</b>		<b>14,42</b>	<b>19,24</b>	<b>19,88</b>	<b>21,06</b>	<b>23,92</b>	
15a	BR1 BP3 G2 W1 P1 FG1 01		14,30	17,78	20,37	23,08		
15b	BR1 BP3 G2 W1 P1 FG3 01		14,17	18,31	20,06	22,89		
<b>15</b>	<b>BR1 BP3 G2 W1 P1 FG</b>		<b>14,24</b>	<b>18,05</b>	<b>20,22</b>	<b>22,99</b>		
16a	BR1 BP3 G2 W1 P1 HD1 01	11,26	14,32	17,89	20,21	23,05		
16b	BR1 BP3 G2 W1 P1 HD3 01	11,39	14,26	17,78	20,18	22,87		
<b>16</b>	<b>BR1 BP3 G2 W1 P1 HD</b>	<b>11,33</b>	<b>14,29</b>	<b>17,84</b>	<b>20,20</b>	<b>22,96</b>		
	<b>BR1 BP3 G2 W1 P1</b>	<b>11,33</b>	<b>14,26</b>	<b>17,94</b>	<b>20,21</b>	<b>22,97</b>		
17a	BR1 BP3 G2 W3 P1 FG1 01	11,99	15,27	-	19,84	23,62		
17b	BR1 BP3 G2 W3 P1 FG3 01	-	15,44	-	19,53	23,42		
<b>17</b>	<b>BR1 BP3 G2 W3 P1 FG</b>	<b>11,99</b>	<b>15,36</b>		<b>19,69</b>	<b>23,52</b>		
18a	BR1 BP3 G2 W3 P1 HD1 01	11,87	15,28	-	19,41	23,48		
18b	BR1 BP3 G2 W3 P1 HD3 01	11,83	15,28	-	19,42	23,56		
<b>18</b>	<b>BR1 BP3 G2 W3 P1 HD</b>	<b>11,85</b>	<b>15,28</b>		<b>19,42</b>	<b>23,52</b>		
	<b>BR1 BP3 G2 W3 P1</b>	<b>11,90</b>	<b>15,32</b>		<b>19,55</b>	<b>23,52</b>		
19a	BR1 BP3 G2 W3 P2 FG1 01	11,36	14,32	16,15	16,99	19,63	23,54	
19b	BR1 BP3 G2 W3 P2 FG1 02	11,94	15,37	16,26	17,08	19,37	23,40	
19c	BR1 BP3 G2 W3 P2 FG3 01	11,79	15,28	16,10	17,07	19,42	23,38	
<b>19</b>	<b>BR1 BP3 G2 W3 P2 FG</b>	<b>11,70</b>	<b>14,99</b>	<b>16,17</b>	<b>17,05</b>	<b>19,47</b>	<b>23,44</b>	
20a	BR1 BP3 G2 W3 P2 HD1 01	11,83	15,27	16,01	17,10	19,54	23,59	
20b	BR1 BP3 G2 W3 P2 HD3 01	11,75	15,26	16,14	17,19	19,47	23,33	
<b>20</b>	<b>BR1 BP3 G2 W3 P2 HD</b>	<b>11,79</b>	<b>15,27</b>	<b>16,08</b>	<b>17,15</b>	<b>19,51</b>	<b>23,46</b>	
	<b>BR1 BP3 G2 W3 P2</b>	<b>11,73</b>	<b>15,10</b>	<b>16,13</b>	<b>17,09</b>	<b>19,49</b>	<b>23,45</b>	

Z	Eigenfrequenzen	Mittelwerte der Eigenfrequenzen [Hz]						
		f <sub>0</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>
21a	BR1 BP3 G2 W4 P1 FG1 01	11,46	-	-	17,49	18,29	20,00	23,54
21b	BR1 BP3 G2 W4 P1 FG3 01	11,87	14,36	-	17,38	18,46	20,10	23,64
<b>21</b>	<b>BR1 BP3 G2 W4 P1 FG</b>	<b>11,67</b>	<b>14,36</b>		<b>17,44</b>	<b>18,38</b>	<b>20,05</b>	<b>23,59</b>
22a	BR1 BP3 G2 W4 P1 HD1 01	11,72	14,43	16,97	17,30	18,44	19,92	23,77
22b	BR1 BP3 G2 W4 P1 HD3 01	11,79	14,46	16,82	17,42	18,41	19,87	23,71
<b>22</b>	<b>BR1 BP3 G2 W4 P1 HD</b>	<b>11,76</b>	<b>14,45</b>	<b>16,90</b>	<b>17,36</b>	<b>18,43</b>	<b>19,90</b>	<b>23,74</b>
	<b>BR1 BP3 G2 W4 P1</b>	<b>11,71</b>	<b>14,42</b>	<b>16,90</b>	<b>17,40</b>	<b>18,40</b>	<b>19,97</b>	<b>23,67</b>
23a	BR1 BP3 G2 W4 P2 FG1 01		14,00	-	16,87	18,29	19,94	24,16
23b	BR1 BP3 G2 W4 P2 FG3 01		14,22	-	16,80	18,40	20,00	23,82
<b>23</b>	<b>BR1 BP3 G2 W4 P2 FG</b>		<b>14,11</b>		<b>16,84</b>	<b>18,35</b>	<b>19,97</b>	<b>23,99</b>
24a	BR1 BP3 G2 W4 P2 HD1 01	11,68	14,54	-	16,89	18,40	19,92	23,78
24b	BR1 BP3 G2 W4 P2 HD3 01	11,74	14,70	-	16,96	18,44	20,00	23,74
<b>24</b>	<b>BR1 BP3 G2 W4 P2 HD</b>	<b>11,71</b>	<b>14,62</b>		<b>16,93</b>	<b>18,42</b>	<b>19,96</b>	<b>23,76</b>
	<b>BR1 BP3 G2 W4 P2</b>	<b>11,71</b>	<b>14,37</b>		<b>16,88</b>	<b>18,38</b>	<b>19,97</b>	<b>23,88</b>
25a	BR1 BP3 G2 W4 P4 FG1 01	-	-	16,88	-	19,39	-	23,73
25b	BR1 BP3 G2 W4 P4 FG3 01	11,86	14,37	16,89	-	-	19,88	23,42
<b>25</b>	<b>BR1 BP3 G2 W4 P4 FG</b>	<b>11,86</b>	<b>14,37</b>	<b>16,89</b>		<b>19,39</b>	<b>19,88</b>	<b>23,58</b>
26a	BR1 BP3 G2 W4 P4 HD1 01	11,79	14,47	16,84	-	19,32	19,91	23,68
26b	BR1 BP3 G2 W4 P4 HD3 01	11,83	14,33	16,92	-	19,33	19,90	23,75
<b>26</b>	<b>BR1 BP3 G2 W4 P4 HD</b>	<b>11,81</b>	<b>14,40</b>	<b>16,88</b>		<b>19,33</b>	<b>19,91</b>	<b>23,72</b>
	<b>BR1 BP3 G2 W4 P4</b>	<b>11,83</b>	<b>14,39</b>	<b>16,88</b>		<b>19,35</b>	<b>19,90</b>	<b>23,65</b>
27a	BR1 BP3 G2 W4 P6 FG1 01		14,61	19,03	19,84	21,07	-	
27b	BR1 BP3 G2 W4 P6 FG3 01		14,29	19,10	20,03	21,35	23,40	
<b>27</b>	<b>BR1 BP3 G2 W4 P6 FG</b>		<b>14,45</b>	<b>19,07</b>	<b>19,94</b>	<b>21,21</b>	<b>23,40</b>	
28a	BR1 BP3 G2 W4 P6 HD1 01		14,46	18,35	19,13	21,10	23,62	
28b	BR1 BP3 G2 W4 P6 HD2 01		14,39	18,32	19,25	21,12	23,65	
28c	BR1 BP3 G2 W4 P6 HD3 01		14,32	18,33	19,32	21,14	-	
28d	BR1 BP3 G2 W4 P6 HD3 02		14,42	18,33	19,08	21,08	23,83	
<b>28</b>	<b>BR1 BP3 G2 W4 P6 HD</b>		<b>14,40</b>	<b>18,33</b>	<b>19,20</b>	<b>21,11</b>	<b>23,70</b>	
	<b>BR1 BP3 G2 W4 P6</b>		<b>14,42</b>	<b>18,58</b>	<b>19,44</b>	<b>21,14</b>	<b>23,63</b>	
29a	BR2 BP2 G1 W1 P1 FG1 01		14,20	16,99	-			
29b	BR2 BP2 G1 W1 P1 FG1 02		14,22	16,59	-			
29c	BR2 BP2 G1 W1 P1 FG3 01		-	16,60	21,93			
29d	BR2 BP2 G1 W1 P1 FG3 02		-	17,07	-			
<b>29</b>	<b>BR2 BP2 G1 W1 P1 FG</b>		<b>14,21</b>	<b>16,81</b>	<b>21,93</b>			
30a	BR2 BP2 G1 W1 P1 HD1 01		14,63	16,67	21,70	25,34		
30b	BR2 BP2 G1 W1 P1 HD1 02		14,60	16,64	21,71	25,33		
30c	BR2 BP2 G1 W1 P1 HD1 03		14,59	16,59	21,70	25,33		
30d	BR2 BP2 G1 W1 P1 HD3 01		14,47	16,45	21,71	25,33		
30e	BR2 BP2 G1 W1 P1 HD3 02		14,80	16,58	21,71	25,40		
30f	BR2 BP2 G1 W1 P1 HD3 03		14,64	16,59	21,66	25,37		
<b>30</b>	<b>BR2 BP2 G1 W1 P1 HD</b>		<b>14,62</b>	<b>16,59</b>	<b>21,70</b>	<b>25,35</b>		
	<b>BR2 BP2 G1 W1 P1</b>		<b>14,52</b>	<b>16,68</b>	<b>21,73</b>	<b>25,35</b>		

Z.	Eigenfrequenzen	Mittelwerte der Eigenfrequenzen [Hz]						
		f <sub>0</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>	f <sub>4</sub>	f <sub>5</sub>	f <sub>6</sub>
31a	BR2 BP2 G1 W1 P5 FG1 01		20,86	22,81	24,74	-		
31b	BR2 BP2 G1 W1 P5 FG1 02		20,64	22,72	24,95	25,81		
31c	BR2 BP2 G1 W1 P5 FG3 01		-	23,07	25,05	25,84		
31d	BR2 BP2 G1 W1 P5 FG3 02		20,84	22,97	24,83	-		
<b>31</b>	<b>BR2 BP2 G1 W1 P5 FG</b>		<b>20,78</b>	<b>22,89</b>	<b>24,89</b>	<b>25,83</b>		
32a	BR2 BP2 G1 W1 P5 HD1 01		20,97	22,83	24,96	25,75		
32b	BR2 BP2 G1 W1 P5 HD1 02		20,92	22,63	24,77	25,69		
32c	BR2 BP2 G1 W1 P5 HD1 03	ausgesondert wegen Störung durch Bauarbeiten						
32d	BR2 BP2 G1 W1 P5 HD3 01		20,98	22,65	24,90	25,69		
32e	BR2 BP2 G1 W1 P5 HD3 02		20,84	22,62	24,80	25,61		
32f	BR2 BP2 G1 W1 P5 HD3 03		20,90	22,62	24,92	25,66		
<b>32</b>	<b>BR2 BP2 G1 W1 P5 HD</b>		<b>20,92</b>	<b>22,67</b>	<b>24,87</b>	<b>25,68</b>		
	BR2 BP2 G1 W1 P5		20,87	22,77	24,88	25,72		

## 4.5 Eigenfrequenzen Ausbauphase

Während der Messungen befand sich die anregende Versuchsperson auf der Platte.

Z.	Eigenfrequenzen	Mittelwerte der Eigenfrequenzen [Hz]			
		$f_x$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
1a	BR1 BP4 G1 W1 P1 FG1_01	9,18	16,32		
1b	BR1 BP4 G1 W1 P1 FG2_01	5,98	16,65		
1c	BR1 BP4 G1 W1 P1 FG3_01	6,28	16,92		
<b>1</b>	<b>BR1 BP4 G1 W1 P1 FG</b>	<b>7,15</b>	<b>16,63</b>		
2a	BR1 BP4 G1 W1 P1 HD1_01		16,17	18,22	
2b	BR1 BP4 G1 W1 P1 HD2_01		16,34	18,11	
2c	BR1 BP4 G1 W1 P1 HD3_01		16,17	18,50	
<b>2</b>	<b>BR1 BP4 G1 W1 P1 HD</b>		<b>16,23</b>	<b>18,28</b>	
	<b>BR1 BP4 G1 W1 P1</b>	<b>7,15</b>	<b>16,43</b>	<b>18,28</b>	
3a	BR1 BP4 G1 W3 P1 FG1_01		14,20		
3b	BR1 BP4 G1 W3 P1 FG3_01	5,94	14,48		
<b>3</b>	<b>BR1 BP4 G1 W3 P1 FG</b>	<b>5,94</b>	<b>14,34</b>		
4a	BR1 BP4 G1 W3 P1 HD1_01		14,06	15,22	20,39
4b	BR1 BP4 G1 W3 P1 HD3_01		14,34	15,34	20,56
<b>4</b>	<b>BR1 BP4 G1 W3 P1 HD</b>		<b>14,20</b>	<b>15,28</b>	<b>20,48</b>
	<b>BR1 BP4 G1 W3 P1</b>	<b>5,94</b>	<b>14,27</b>	<b>15,28</b>	<b>20,48</b>
5a	BR1 BP4 G1 W3 P2 FG1_01	10,42			20,67
5b	BR1 BP4 G1 W3 P2 FG3_01	5,51			20,52
<b>5</b>	<b>BR1 BP4 G1 W3 P2 FG</b>	<b>7,97</b>			<b>20,60</b>
6a	BR1 BP4 G1 W3 P2 HD1_01		14,50	17,78	20,45
6c	BR1 BP4 G1 W3 P2 HD3_01		14,34	18,06	20,34
<b>6</b>	<b>BR1 BP4 G1 W3 P2 HD</b>		<b>14,42</b>	<b>17,92</b>	<b>20,40</b>
	<b>BR1 BP4 G1 W3 P2</b>	<b>7,97</b>	<b>14,42</b>	<b>17,92</b>	<b>20,50</b>
7a	BR1 BP4 G1 W4 P1 FG1_01		13,04	24,09	
7b	BR1 BP4 G1 W4 P1 FG3_01		13,19	23,29	
7c	BR1 BP4 G1 W4 P1 FG3_02	5,95	12,90	24,88	
<b>7</b>	<b>BR1 BP4 G1 W4 P1 FG</b>	<b>5,95</b>	<b>13,04</b>	<b>24,09</b>	
8a	BR1 BP4 G1 W4 P1 HD1_01		13,00	14,84	
8b	BR1 BP4 G1 W4 P1 HD3_01		13,17	14,84	
<b>8</b>	<b>BR1 BP4 G1 W4 P1 HD</b>		<b>13,09</b>	<b>14,84</b>	
	<b>BR1 BP4 G1 W4 P1</b>	<b>5,95</b>	<b>13,06</b>	<b>20,39</b>	
9a	BR1 BP4 G1 W4 P2 FG1_01	9,12	17,99	24,72	
9b	BR1 BP4 G1 W4 P2 FG3_01	5,92	18,17	25,13	
<b>9</b>	<b>BR1 BP4 G1 W4 P2 FG</b>	<b>7,52</b>	<b>18,08</b>	<b>24,93</b>	
10a	BR1 BP4 G1 W4 P2 HD1_01		17,06	22,00	
10b	BR1 BP4 G1 W4 P2 HD1_02		17,17	23,84	
10c	BR1 BP4 G1 W4 P2 HD3_01		17,17	20,25	
<b>10</b>	<b>BR1 BP4 G1 W4 P2 HD</b>		<b>17,13</b>	<b>22,03</b>	
	<b>BR1 BP4 G1 W4 P2</b>	<b>7,52</b>	<b>17,51</b>	<b>23,19</b>	
11a	BR1 BP4 G1 W4 P4 FG1_01	9,79			23,06
11b	BR1 BP4 G1 W4 P4 FG3_01	6,72			22,36
<b>11</b>	<b>BR1 BP4 G1 W4 P4 FG</b>	<b>8,26</b>			<b>22,71</b>
12a	BR1 BP4 G1 W4 P4 HD1_01		18,78	20,78	22,11
12b	BR1 BP4 G1 W4 P4 HD3_01		18,34	20,56	22,06
<b>12</b>	<b>BR1 BP4 G1 W4 P4 HD</b>		<b>18,56</b>	<b>20,67</b>	<b>22,09</b>
	<b>BR1 BP4 G1 W4 P4</b>	<b>8,26</b>	<b>18,56</b>	<b>20,67</b>	<b>22,40</b>

Frequenz mit hoher Intensität

Z	Eigenfrequenzen	Mittelwerte der Eigenfrequenzen [Hz]			
		f <sub>x</sub>	f <sub>1</sub>	f <sub>2</sub>	f <sub>3</sub>
13a	BR1 BP4 G1 W4 P6 FG1 01	9,90	17,62	19,16	
13b	BR1 BP4 G1 W4 P6 FG3 01	5,51	17,54	20,20	
<b>13</b>	<b>BR1 BP4 G1 W4 P6 FG</b>	<b>7,71</b>	<b>17,58</b>	<b>19,68</b>	
14a	BR1 BP4 G1 W4 P6 HD1 01		17,06	19,17	
14b	BR1 BP4 G1 W4 P6 HD3 01		17,17	19,22	
<b>14</b>	<b>BR1 BP4 G1 W4 P6 HD</b>		<b>17,12</b>	<b>19,20</b>	
	<b>BR1 BP4 G1 W4 P6</b>	<b>7,71</b>	<b>17,35</b>	<b>19,44</b>	
15a	BR1 BP4 G2 W1 P1 FG1 01	8,04	16,31	18,92	
15b	BR1 BP4 G2 W1 P1 FG3 01	5,56	16,78	18,74	
<b>15</b>	<b>BR1 BP4 G2 W1 P1 FG</b>	<b>6,80</b>	<b>16,55</b>	<b>18,83</b>	
16a	BR1 BP4 G2 W1 P1 HD1 01		16,34	17,78	
16b	BR1 BP4 G2 W1 P1 HD3 01		16,34	18,00	
<b>16</b>	<b>BR1 BP4 G2 W1 P1 HD</b>		<b>16,34</b>	<b>17,89</b>	
	<b>BR1 BP4 G2 W1 P1</b>	<b>6,80</b>	<b>16,44</b>	<b>18,36</b>	
17a	BR1 BP4 G2 W3 P1 FG1 01	-	-	15,41	
17b	BR1 BP4 G2 W3 P1 FG3 01	6,01	-	14,84	
<b>17</b>	<b>BR1 BP4 G2 W3 P1 FG</b>	<b>6,01</b>		<b>15,13</b>	
18a	BR1 BP4 G2 W3 P1 HD1 01		-	15,28	20,89
18b	BR1 BP4 G2 W3 P1 HD3 01		-	15,22	20,73
<b>18</b>	<b>BR1 BP4 G2 W3 P1 HD</b>			<b>15,25</b>	<b>20,81</b>
	<b>BR1 BP4 G2 W3 P1</b>	<b>6,01</b>		<b>15,19</b>	<b>20,81</b>
19a	BR1 BP4 G2 W3 P2 FG1 01	9,22			22,04
19b	BR1 BP4 G2 W3 P2 FG3 01	5,64			20,78
<b>19</b>	<b>BR1 BP4 G2 W3 P2 FG</b>	<b>7,43</b>			<b>21,41</b>
20a	BR1 BP4 G2 W3 P2 HD1 01		12,84	17,61	20,50
20b	BR1 BP4 G2 W3 P2 HD1 02		12,72	17,72	20,28
20c	BR1 BP4 G2 W3 P2 HD3 01		13,00	17,78	20,67
<b>20</b>	<b>BR1 BP4 G2 W3 P2 HD</b>		<b>12,85</b>	<b>17,70</b>	<b>20,48</b>
	<b>BR1 BP4 G2 W3 P2</b>	<b>7,43</b>	<b>12,85</b>	<b>17,70</b>	<b>20,85</b>
21a	BR1 BP4 G2 W4 P1 FG1 01	-	12,51		25,65
21b	BR1 BP4 G2 W4 P1 FG3 01	6,14	13,19		24,88
<b>21</b>	<b>BR1 BP4 G2 W4 P1 FG</b>	<b>6,14</b>	<b>12,85</b>		<b>25,27</b>
22a	BR1 BP4 G2 W4 P1 HD1 01		12,50	16,72	
22b	BR1 BP4 G2 W4 P1 HD3 01		12,50	16,67	
<b>22</b>	<b>BR1 BP4 G2 W4 P1 HD</b>		<b>12,50</b>	<b>16,70</b>	
	<b>BR1 BP4 G2 W4 P1</b>	<b>6,14</b>	<b>12,68</b>	<b>16,70</b>	<b>25,27</b>
23a	BR1 BP4 G2 W4 P2 FG1 01	10,37	17,52	25,71	
23b	BR1 BP4 G2 W4 P2 FG3 01	6,14	17,81	24,15	
<b>23</b>	<b>BR1 BP4 G2 W4 P2 FG</b>	<b>8,26</b>	<b>17,67</b>	<b>24,93</b>	
24a	BR1 BP4 G2 W4 P2 HD1 01		16,95	24,17	
24b	BR1 BP4 G2 W4 P2 HD3 01		17,00	22,17	
<b>24</b>	<b>BR1 BP4 G2 W4 P2 HD</b>		<b>16,98</b>	<b>23,17</b>	
	<b>BR1 BP4 G2 W4 P2</b>	<b>8,26</b>	<b>17,32</b>	<b>24,05</b>	

Frequenz mit hoher Intensität

Z.	Eigenfrequenzen	Mittelwerte der Eigenfrequenzen [Hz]			
		$f_x$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
25a	BR1 BP4 G2 W4 P4 FG1 01	7,35	17,24		
25b	BR1 BP4 G2 W4 P4 FG3 01	6,71	19,33		
<b>25</b>	<b>BR1 BP4 G2 W4 P4 FG</b>	<b>7,03</b>	<b>18,29</b>		
26a	BR1 BP4 G2 W4 P4 HD1 01		18,45	-	22,39
26b	BR1 BP4 G2 W4 P4 HD3 01		18,34	-	22,06
<b>26</b>	<b>BR1 BP4 G2 W4 P4 HD</b>		<b>18,40</b>		<b>22,23</b>
	<b>BR1 BP4 G2 W4 P4</b>	<b>7,03</b>	<b>18,34</b>		<b>22,23</b>
27a	BR1 BP4 G2 W4 P6 FG1 01	8,60	16,89	-	
27b	BR1 BP4 G2 W4 P6 FG3 01	6,02	17,75	18,92	
<b>27</b>	<b>BR1 BP4 G2 W4 P6 FG</b>	<b>7,31</b>	<b>17,32</b>	<b>18,92</b>	
28a	BR1 BP4 G2 W4 P6 HD1 01		16,61	18,72	
28b	BR1 BP4 G2 W4 P6 HD3 01		17,00	18,84	
<b>28</b>	<b>BR1 BP4 G2 W4 P6 HD</b>		<b>16,81</b>	<b>18,78</b>	
	<b>BR1 BP4 G2 W4 P6</b>	<b>7,31</b>	<b>17,06</b>	<b>18,83</b>	
29a	BR2 BP4 G1 W1 P1 FG1 01	7,43	16,93		
29b	BR2 BP4 G1 W1 P1 FG1 02	7,05	16,52		
29c	BR2 BP4 G1 W1 P1 FG3 01	5,99	17,02		
29d	BR2 BP4 G1 W1 P1 FG3 02	5,96	17,07		
<b>29</b>	<b>BR2 BP4 G1 W1 P1 FG</b>	<b>6,61</b>	<b>16,89</b>		
30a	BR2 BP4 G1 W1 P1 HD1 01		15,50	17,28	
30b	BR2 BP4 G1 W1 P1 HD1 02		15,56	17,39	
30c	BR2 BP4 G1 W1 P1 HD3 01		15,50	17,45	
30d	BR2 BP4 G1 W1 P1 HD3 02		15,67	17,43	
<b>30</b>	<b>BR2 BP4 G1 W1 P1 HD</b>		<b>15,56</b>	<b>17,39</b>	
	<b>BR2 BP4 G1 W1 P1</b>	<b>6,61</b>	<b>16,22</b>	<b>17,39</b>	
31a	BR2 BP4 G1 W1 P5 FG1 01	-	11,72		
31b	BR2 BP4 G1 W1 P5 FG1 02	-	11,92		
31c	BR2 BP4 G1 W1 P5 FG3 01	6,10	12,56		
31d	BR2 BP4 G1 W1 P5 FG3 02	6,09	12,25		
<b>31</b>	<b>BR2 BP4 G1 W1 P5 FG</b>	<b>6,10</b>	<b>12,11</b>		
32a	BR2 BP4 G1 W1 P5 HD1 01		12,17	19,34	
32b	BR2 BP4 G1 W1 P5 HD1 02		12,28	19,45	
32c	BR2 BP4 G1 W1 P5 HD3 01		12,22	19,72	
32d	BR2 BP4 G1 W1 P5 HD3 02		12,34	19,95	
<b>32</b>	<b>BR2 BP4 G1 W1 P5 HD</b>		<b>12,25</b>	<b>19,62</b>	
	<b>BR2 BP4 G1 W1 P5</b>	<b>6,10</b>	<b>12,18</b>	<b>19,62</b>	

Frequenz mit hoher Intensität



Nr.	Lehrsrches Dämpfungsmaß		Anzahl VP						Auswertung Messpunkte						Auswertung Gesamt								
			effektive Dämpfung		modale Dämpfung		Frequenzbereich		Dämpfung [Hz]	mthl. $\zeta$ M1 [%]	mthl. $\zeta$ M2 [%]	mthl. $\zeta$ M3 [%]	Abw. VP3 zu VP1 [%]	(Bezugsb.) M1	Abw. VP3 zu VP1 [%]	(Bezugsb.) M2	Abw. VP3 zu VP1 [%]	(Bezugsb.) M3	Mittelwert [%]	Stabw [%]	Median [%]	5%-Fraktill [%]	Anzahl Werte
			Werte	Startwert	Werte	Startwert	Min	Max															
20	BR1_BP3_G2_W3_P2_HD		2	10	2	10	2	12,5	15,6	3,1	$\zeta_{eff}$	4,23	4,02	4,23	- 19,9	- 5,9	- 20,7	4,16	0,45	4,02	3,75	6	
											$\zeta_{11}$	2,57	2,59	2,55	- 15,8	- 14,1	- 13,2	2,57	0,22	2,56	2,36	6	
22	BR1_BP3_G2_W4_P1_HD		2	10	2	10	2	12,3	14,8	2,5	$\zeta_{eff}$	2,91	2,87	2,97	- 10,2	- 9,6	- 13,8	2,92	0,20	2,89	2,73	6	
											$\zeta_{11}$	2,56	2,58	2,50	- 8,1	- 7,7	- 7,2	2,55	0,12	2,54	2,42	6	
24	BR1_BP3_G2_W4_P2_HD		2	10	2	10	2	12,2	15,5	3,3	$\zeta_{eff}$	1,71	1,72	1,74	- 35,5	- 33,8	- 31,9	1,72	0,38	1,74	1,35	6	
											$\zeta_{11}$	4,81	4,84	4,96	- 25,2	- 23,2	- 31,5	4,87	0,84	4,84	4,05	6	
26	BR1_BP3_G2_W4_P4_HD		2	10	6	10	2	12,2	14,8	2,6	$\zeta_{eff}$	2,07	2,08	2,04	- 36,8	- 39,7	- 40,0	2,06	0,55	2,07	1,54	6	
											$\zeta_{11}$	3,81	3,80	3,75	- 4,4	- 2,2	- 1,4	3,79	0,07	3,77	3,73	6	
28	BR1_BP3_G2_W4_P6_HD		3	10	2	10	2	12,2	15,1	2,9	$\zeta_{eff}$	4,71	4,65	4,61	- 23,7	- 3,6	18,0	4,65	0,48	4,80	3,91	12	
											$\zeta_{11}$	3,87	4,33	4,41	- 1,4	- 0,8	8,1	4,20	0,31	4,25	3,72	12	
30	BR2_BP2_G1_W1_P1_HD		2	10	2	10	2	12,0	15,0	3	$\zeta_{eff}$	3,61	3,68	3,69	8,0	4,3	10,6	3,66	0,17	3,63	3,43	18	
											$\zeta_{11}$	3,08	3,09	3,07	- 1,3	0,8	- 1,3	3,08	0,06	3,08	2,98	18	
32	BR2_BP2_G1_W1_P5_HD		2	10	2	10	2	16,5	21,2	4,7	$\zeta_{eff}$	2,16	2,11	2,12	- 25,2	- 9,7	- 20,3	2,13	0,49	2,24	1,44	15	
											$\zeta_{11}$	3,01	3,21	2,96	- 15,4	- 31,9	- 20,6	3,06	0,41	2,95	2,73	15	





Nr.	Lehrsches Dämpfungsmaß		Anzahl VP		effektive Dämpfung				Dämpfung				Anzahl VP				Auswertung Messpunkte				Auswertung Gesamt				Anzahl Werte	
					Werte	Startwert	Werte	Startwert	min	max	bereich	modale	Startwert	min	max	Differenz	Hz	mttl. $\zeta$ M1 [%]	mttl. $\zeta$ M2 [%]	mttl. $\zeta$ M3 [%]	Abw. VP3 zu VP1 [%]	(Bezugsb. M1)	Abw. VP3 zu VP1 [%]	(Bezugsb. M2)		Abw. VP3 zu VP1 [%]
14	BRI_BP4_G1_W4_P6_HD	2	6	2	6	2	10,0	18,2	8,2	$\zeta_{eff}$ heel-drop 1	$\zeta_1$ heel-drop 1	$\zeta_{eff}$ heel-drop 2	$\zeta_1$ heel-drop 2	$\zeta_{eff}$ heel-drop 3	$\zeta_1$ heel-drop 3	6,16	6,57	6,62	15,1	- 6,6	- 12,9	6,45	0,48	6,47	5,83	6
																6,00	6,94	6,32	9,1	- 19,9	- 21,3	6,42	0,82	6,23	5,61	6
																6,83	6,89	5,77	2,6	- 15,4	- 26,8	6,50	0,88	6,70	5,24	6
																6,04	7,05	6,45	- 1,8	- 11,7	- 11,7	6,51	0,59	6,36	6,00	6
																7,61	6,72	6,69	- 15,2	- 6,3	- 15,7	7,01	0,72	6,96	6,22	6
																6,11	7,09	6,57	12,5	2,2	- 0,4	6,59	0,50	6,57	5,93	6
																$\zeta_{eff}$ ges.				6,65	0,72	6,70	5,60	18		
																$\zeta_1$ ges.				6,51	0,62	6,51	5,69	18		
16	BRI_BP4_G2_W1_P1_HD	2	6	2	6	2	10,0	23,0	13	$\zeta_{eff}$ heel-drop 1	$\zeta_1$ heel-drop 1	$\zeta_{eff}$ heel-drop 2	$\zeta_1$ heel-drop 2	$\zeta_{eff}$ heel-drop 3	$\zeta_1$ heel-drop 3	6,67	7,40	6,66	- 10,7	- 24,7	- 7,8	6,91	0,82	6,66	6,31	6
																6,04	6,81	5,54	- 18,1	- 8,9	0,6	6,13	0,72	6,02	5,46	6
																7,30	8,69	7,28	-	- 7,9	- 7,8	7,85	0,83	7,58	7,05	5
																5,72	6,73	5,88	- 12,1	9,5	4,9	6,11	0,58	6,06	5,45	6
																7,76	8,19	6,92	- 3,8	- 9,7	- 6,3	7,62	0,66	7,69	6,80	6
																6,60	6,60	5,80	- 3,3	- 19,0	3,0	6,33	0,61	6,20	5,76	6
																$\zeta_{eff}$ ges.				7,44	0,83	7,30	6,35	17		
																$\zeta_1$ ges.				6,19	0,61	6,06	5,42	18		
18	BRI_BP4_G2_W3_P1_HD	2	6	2	6	2	11,0	16,6	5,6	$\zeta_{eff}$ heel-drop 1	$\zeta_1$ heel-drop 1	$\zeta_{eff}$ heel-drop 2	$\zeta_1$ heel-drop 2	$\zeta_{eff}$ heel-drop 3	$\zeta_1$ heel-drop 3	7,02	6,65	6,12	- 11,4	- 6,4	- 6,5	6,60	0,52	6,51	6,02	6
																6,19	6,37	6,05	- 5,0	- 13,4	7,1	6,20	0,36	6,15	5,86	6
																6,24	5,72	6,00	- 4,2	4,0	- 8,2	5,99	0,30	5,97	5,64	6
																6,26	6,74	6,06	- 6,1	- 7,2	3,9	6,35	0,38	6,31	5,97	6
																6,55	6,13	5,96	- 16,0	- 16,7	- 8,8	6,21	0,60	6,11	5,60	6
																6,25	6,44	6,28	2,0	- 1,4	1,4	6,32	0,11	6,32	6,20	6
																$\zeta_{eff}$ ges.				6,27	0,53	6,24	5,60	18		
																$\zeta_1$ ges.				6,29	0,30	6,28	5,90	18		

Nr.	Lehr'sches Dämpfungsmaß		Anzahl VP		effektive Dämpfung		Dämpfung modale		Dämpfung modale Bereich		Dämpfung modale [Hz]		Auswertung Messpunkte						Auswertung Gesamt					Anzahl Werte
			Werte	Startwert	Werte	Startwert	Min	Max	Differenz	Werte	Startwert	Werte	Startwert	mittl. $\zeta$ M1 [%]	mittl. $\zeta$ M2 [%]	mittl. $\zeta$ M3 [%]	Abw. VP3 zu VP1 (Bezugsb.- M1 [%])	Abw. VP3 zu VP1 (Bezugsb.- M2 [%])	Abw. VP3 zu VP1 (Bezugsb.- M3 [%])	Mittelwert [%]	Stabw [%]	Median [%]	5%-Fraktill [%]	
20	BR1_BP4_G2_W3_P2_HD		2	6	2	6	2	10,0	18,5	8,5	$\zeta_{eff}$ heel-drop 1	$\zeta_{1}$ heel-drop 1	13,07	10,33	9,17	- 18,6	- 12,0	- 5,2	10,86	2,42	10,12	8,99	9	
											$\zeta_{eff}$ heel-drop 2	$\zeta_{1}$ heel-drop 2	5,68	4,79	4,24	2,9	6,0	13,1	4,90	0,69	4,76	4,03	9	
											$\zeta_{eff}$ heel-drop 3	$\zeta_{1}$ heel-drop 3	10,00	10,13	8,75	2,1	0,6	11,0	9,62	0,78	9,93	8,48	9	
											$\zeta_{eff}$ heel-drop 3	$\zeta_{1}$ heel-drop 3	4,38	4,70	4,19	44,0	3,0	6,8	4,42	0,54	4,31	3,82	9	
											$\zeta_{eff}$ ges.	$\zeta_{1}$ ges.	10,74	10,58	8,92	-	1,5	16,0	10,00	1,20	9,90	8,49	8	
											$\zeta_{eff}$ ges.	$\zeta_{1}$ ges.	4,99	4,75	4,27	- 3,8	- 9,8	- 8,5	4,67	0,55	4,43	4,03	9	
													<b>10,17</b>	<b>1,66</b>	<b>9,96</b>	<b>8,40</b>	<b>26</b>	<b>10,17</b>	<b>1,66</b>	<b>9,96</b>	<b>8,40</b>	<b>26</b>		
													<b>4,66</b>	<b>0,61</b>	<b>4,62</b>	<b>3,88</b>	<b>27</b>	<b>4,66</b>	<b>0,61</b>	<b>4,62</b>	<b>3,88</b>	<b>27</b>		
22	BR1_BP4_G2_W4_P1_HD		2	6	2	6	2	8,0	16,0	8	$\zeta_{eff}$ heel-drop 1	$\zeta_{1}$ heel-drop 1	5,83	5,95	6,03	1,4	5,5	7,3	5,94	0,19	5,84	5,79	6	
											$\zeta_{eff}$ heel-drop 2	$\zeta_{1}$ heel-drop 2	6,27	6,62	6,12	- 0,7	1,2	- 1,1	6,34	0,23	6,27	6,11	6	
											$\zeta_{eff}$ heel-drop 3	$\zeta_{1}$ heel-drop 3	5,62	5,50	5,47	- 4,7	- 6,1	- 4,5	5,53	0,18	5,54	5,33	6	
											$\zeta_{eff}$ ges.	$\zeta_{1}$ ges.	6,14	6,50	5,98	- 6,9	- 6,7	- 7,1	6,21	0,34	6,24	5,80	6	
											$\zeta_{eff}$ ges.	$\zeta_{1}$ ges.	5,63	5,90	6,02	- 14,0	- 14,0	- 13,2	5,85	0,51	5,82	5,27	6	
											$\zeta_{eff}$ ges.	$\zeta_{1}$ ges.	6,18	6,51	6,07	- 17,2	- 20,9	- 15,8	6,26	0,72	6,17	5,57	6	
													<b>5,77</b>	<b>0,36</b>	<b>5,77</b>	<b>5,31</b>	<b>18</b>	<b>5,77</b>	<b>0,36</b>	<b>5,77</b>	<b>5,31</b>	<b>18</b>		
													<b>6,27</b>	<b>0,45</b>	<b>6,26</b>	<b>5,59</b>	<b>18</b>	<b>6,27</b>	<b>0,45</b>	<b>6,26</b>	<b>5,59</b>	<b>18</b>		
24	BR1_BP4_G2_W4_P2_HD		2	6	2	6	2	10,0	19,5	9,5	$\zeta_{eff}$ heel-drop 1	$\zeta_{1}$ heel-drop 1	8,80	10,21	8,72	- 36,3	- 5,9	- 20,7	9,24	1,59	9,81	7,06	6	
											$\zeta_{eff}$ heel-drop 2	$\zeta_{1}$ heel-drop 2	6,96	6,18	6,24	1,6	10,1	0,0	6,46	0,44	6,38	5,95	6	
											$\zeta_{eff}$ heel-drop 3	$\zeta_{1}$ heel-drop 3	8,44	8,45	8,36	39,8	40,0	- 0,9	8,42	1,26	8,36	7,04	6	
											$\zeta_{eff}$ ges.	$\zeta_{1}$ ges.	7,14	6,42	6,39	- 11,8	- 13,3	- 4,5	6,65	0,56	6,61	6,04	6	
											$\zeta_{eff}$ ges.	$\zeta_{1}$ ges.	8,31	9,82	7,82	- 24,8	- 5,7	- 33,6	8,65	1,57	9,44	6,46	6	
											$\zeta_{eff}$ ges.	$\zeta_{1}$ ges.	7,28	6,59	6,64	- 2,2	- 3,8	1,6	6,83	0,36	6,70	6,49	6	
													<b>8,77</b>	<b>1,43</b>	<b>9,44</b>	<b>6,76</b>	<b>18</b>	<b>8,77</b>	<b>1,43</b>	<b>9,44</b>	<b>6,76</b>	<b>18</b>		
													<b>6,65</b>	<b>0,46</b>	<b>6,64</b>	<b>5,95</b>	<b>18</b>	<b>6,65</b>	<b>0,46</b>	<b>6,64</b>	<b>5,95</b>	<b>18</b>		



Nr.	Lehr'sches Dämpfungsmaß		Anzahl VP				effektive Dämpfung		Dämpfung modale		Frequenzbereich		Auswertung Messpunkte						Auswertung Gesamt				
			Werte	Startwert	Werte	Startwert	Werte	Startwert	Min	Max	Differenz [Hz]	mittl. $\zeta$ M1 [%]	mittl. $\zeta$ M2 [%]	mittl. $\zeta$ M3 [%]	Abw. VP3 zu VP1 (Bezugsb.- M1 [%])	Abw. VP3 zu VP1 (Bezugsb.- M2 [%])	Abw. VP3 zu VP1 (Bezugsb.- M3 [%])	Mittelwert [%]	Stabw [%]	Median [%]	5%-Fraktill [%]	Anzahl Werte	
30	BR2_BP4_G1_W1_P1_HD	2	6	2	6	2	10,0	23,0	13	$\zeta_{eff}$ heel-drop 1 $\zeta_{1}$ heel-drop 1 $\zeta_{eff}$ heel-drop 2 $\zeta_{1}$ heel-drop 2 $\zeta_{eff}$ heel-drop 3 $\zeta_{1}$ heel-drop 3		8,54	9,25	7,85	- 0,8	- 4,3	- 0,7	8,54	0,62	8,55	7,81	12	
												8,23	8,01	8,15	6,3	10,2	5,3	8,13	0,27	8,09	7,79	12	
												8,10	8,81	7,54	2,0	3,8	6,1	8,15	0,59	8,09	7,25	12	
												8,09	7,95	8,28	- 1,6	- 7,0	- 6,4	8,11	0,30	8,14	7,69	12	
												8,27	9,07	7,79	6,7	6,4	7,4	8,38	0,61	8,24	7,66	12	
												8,36	8,20	8,15	5,5	2,1	- 6,8	8,24	0,37	8,18	7,81	12	
												$\zeta_{eff}$ ges.					<b>8,36</b>	<b>0,61</b>	<b>8,31</b>	<b>7,45</b>	<b>36</b>		
												$\zeta_{1}$ ges.					<b>8,16</b>	<b>0,31</b>	<b>8,14</b>	<b>7,77</b>	<b>36</b>		
32	BR2_BP4_G1_W1_P5_HD	2	6	2	6	2	8,0	15,0	7	$\zeta_{eff}$ heel-drop 1 $\zeta_{1}$ heel-drop 1 $\zeta_{eff}$ heel-drop 2 $\zeta_{1}$ heel-drop 2 $\zeta_{eff}$ heel-drop 3 $\zeta_{1}$ heel-drop 3		5,91	5,80	5,97	- 5,7	- 0,8	- 2,4	5,89	0,18	5,91	5,59	12	
												6,37	5,80	6,51	8,2	10,2	6,4	6,23	0,39	6,28	5,59	12	
												5,93	5,90	5,86	0,1	6,4	3,9	5,90	0,27	5,99	5,50	12	
												6,18	5,65	6,28	6,2	5,1	5,1	6,04	0,37	6,00	5,55	12	
												6,70	5,87	5,90	- 42,4	- 29,7	- 29,5	6,16	1,12	6,35	4,53	12	
												5,91	5,47	6,02	- 12,3	- 3,3	- 15,0	5,80	0,40	5,66	5,36	12	
												$\zeta_{eff}$ ges.					<b>5,98</b>	<b>0,66</b>	<b>5,96</b>	<b>4,68</b>	<b>36</b>		
												$\zeta_{1}$ ges.					<b>6,02</b>	<b>0,42</b>	<b>6,03</b>	<b>5,48</b>	<b>36</b>		

# 5 Anhang E - Berechnung der Biegesteifigkeit

## 5.1 BSP ohne Aufbau

**Bestimmung der Biegesteifigkeit für Brettspertholz längs**

b [mm]	h [mm]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	n	(E/E <sub>ref</sub> ) [-]	A [mm <sup>2</sup> ]	n*A	I [mm <sup>4</sup> ]	e [mm <sup>2</sup> ]	n*A*e	n*A*e <sup>2</sup>	n*	es [mm]	n*A*e <sup>2</sup>
1000	39	11000	1,00	39000	39000	4943250	19,5	7,605E+05	1,483E+07	4,943E+06	79,5	2,465E+08	
1000	40	370	0,03	40000	1345	5333333	59	7,938E+04	1,794E+05	1,794E+05	40	2,153E+06	
1000	40	11000	1,00	40000	40000	5333333	99	3,960E+06	3,920E+08	5,333E+06	0	0,000E+00	
1000	40	370	0,03	40000	1345	5333333	139	1,870E+05	2,600E+07	1,794E+05	-40	2,153E+06	
1000	39	11000	1,00	39000	39000	4943250	178,5	6,962E+06	1,243E+09	4,943E+06	-79,5	2,465E+08	
	198				120691				1,195E+07	1,680E+09	1,558E+07		4,973E+08

zs 99 mm  
 J eff 5,129E+08 mm<sup>4</sup>/m  
 EJ eff 5,641E+12 Nmm<sup>2</sup>/m

**Bestimmung der Biegesteifigkeit für Brettspertholz quer**

b [mm]	h [mm]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	n	(E/E <sub>ref</sub> ) [-]	A [mm <sup>2</sup> ]	n*A	I [mm <sup>4</sup> ]	e [mm <sup>2</sup> ]	n*A*e	n*A*e <sup>2</sup>	n*	es [mm]	n*A*e <sup>2</sup>
1000	39	370	0,03	39000	1312	4943250	19,5	2,558E+04	4,988E+05	1,663E+05	79,5	8,291E+06	
1000	40	11000	1,00	40000	40000	5333333	59	2,360E+06	1,392E+08	5,333E+06	40	6,400E+07	
1000	40	370	0,03	40000	1345	5333333	99	1,332E+05	1,319E+07	1,794E+05	0	0,000E+00	
1000	40	11000	1,00	40000	40000	5333333	139	5,560E+06	7,728E+08	5,333E+06	-40	6,400E+07	
1000	39	370	0,03	39000	1312	4943250	178,5	2,342E+05	4,180E+07	1,663E+05	-79,5	8,291E+06	
	198				83969				8,313E+06	9,676E+08	1,118E+07		1,446E+08

zs 99 mm  
 J eff 1,558E+08 mm<sup>4</sup>/m  
 EJ eff 1,713E+12 Nmm<sup>2</sup>/m

## 5.2 BSP mit Aufbau

**Bestimmung der Biegesteifigkeit für Brettsperrholz längs inkl. Estrich ohne Schubverbund**

b [mm]	h [mm]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	n	(E/E <sub>eff</sub> )[-]	A [mm <sup>2</sup> ]	n*A	I [mm <sup>4</sup> ]	e [mm <sup>2</sup> ]	n*A*e	n*A*e <sup>2</sup>	n*	es [mm]	n*A*e <sup>2</sup>
1000	39	11000	370	1,00	39000	39000	4943250	19,5	7,605E+05	1,483E+07	4,943E+06	79,5	2,465E+08
1000	40	370	11000	0,03	40000	1345	5333333	59	7,938E+04	4,684E+06	1,794E+05	40	2,153E+06
1000	40	11000	370	1,00	40000	40000	5333333	99	3,960E+06	3,920E+08	5,333E+06	0	0,000E+00
1000	40	370	11000	0,03	40000	1345	5333333	139	1,870E+05	2,600E+07	1,794E+05	-40	2,153E+06
1000	39	11000	370	1,00	39000	39000	4943250	178,5	6,962E+06	1,243E+09	4,943E+06	-79,5	2,465E+08
	198				120691				1,195E+07	1,680E+09	1,558E+07		4,973E+08

1000	60	30000	1,00	60000	60000	18000000	0	0	18000000	0	0	0	0,000E+00
------	----	-------	------	-------	-------	----------	---	---	----------	---	---	---	-----------

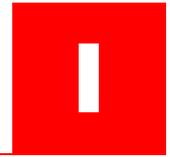
zs 99 mm  
 J eff 5,309E+08 mm<sup>4</sup>/m  
 EJ eff 6,181E+12 Nmm<sup>2</sup>/m

**Bestimmung der Biegesteifigkeit für Brettsperrholz quer inkl. Estrich ohne Schubverbund**

b [mm]	h [mm]	E [N/mm <sup>2</sup> ]	n	(E/E <sub>eff</sub> )[-]	A [mm <sup>2</sup> ]	n*A	I [mm <sup>4</sup> ]	e [mm <sup>2</sup> ]	n*A*e	n*A*e <sup>2</sup>	n*	es [mm]	n*A*e <sup>2</sup>
1000	39	370	11000	0,03	39000	1312	4943250	19,5	2,558E+04	4,988E+05	1,663E+05	79,5	8,291E+06
1000	40	11000	370	1,00	40000	40000	5333333	59	2,360E+06	1,392E+08	5,333E+06	40	6,400E+07
1000	40	370	11000	0,03	40000	1345	5333333	99	1,332E+05	1,319E+07	1,794E+05	0	0,000E+00
1000	40	11000	370	1,00	40000	40000	5333333	139	5,560E+06	7,728E+08	5,333E+06	-40	6,400E+07
1000	39	370	11000	0,03	39000	1312	4943250	178,5	2,342E+05	4,180E+07	1,663E+05	-79,5	8,291E+06
	198				83969				8,313E+06	9,676E+08	1,118E+07		1,446E+08

1000	60	30000	1,00	60000	60000	18000000	0	0	18000000	0	0	0	0
------	----	-------	------	-------	-------	----------	---	---	----------	---	---	---	---

zs 99 mm  
 J eff 1,738E+08 mm<sup>4</sup>/m  
 EJ eff 2,253E+12 Nmm<sup>2</sup>/m



## Literaturverzeichnis

### 1 Normen

- [1] ÖNORM EN 1995-1-1: *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2009-07-01
- [2] ÖNORM B 1995-1-1: *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2010-08-15
- [3] ÖNORM ISO 2631-1: *Mechanische Schwingungen und Stöße - Bewertung der Auswirkung von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 2631-1:1997)*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2007-07-01
- [4] ÖNORM ISO 2631-2: *Mechanische Schwingungen und Stöße - Bewertung der Auswirkung von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen Teil 2: Schwingungen in Gebäuden (1 Hz bis 80 Hz) (ISO 2631-2:2003)*, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2007-07-01

### 2 Bücher/Forschungsarbeiten/Skripten

- [5] Bachmann, H.: *Schwingungsprobleme bei Bauwerken - Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen*, Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, Zürich, 1987  
ISBN: 3-85748-0513
- [6] Brunner, F.K.: *Grundlagen der Messtechnik für Bauingenieure*, Vorlesungsunterlage, Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme, Technische Universität Graz, 2008

- [7] Fitz, M.: *Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Deckensystemen aus Brettspertholz (BSP)*, Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2008
- [8] Flatscher, G.: *Außergewöhnliche Einwirkung „Erdbeben“ - Überlegungen zur versuchstechnischen Erfassung der Verbindungstechnik im Holz-Massivbau*, Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2010
- [9] Flesch, R.; Pacht, H.: *Baudynamik praxisgerecht - Band 1 Berechnungsgrundlagen*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1993  
ISBN: 3-7625-3010-6
- [10] Griffin, M. J.: *Handbook of Human Vibration*, Academic Press, London, 1996  
ISBN: 0-12-303041-2
- [11] Gross, D., et. al.: *Technische Mechanik. Band 3: Kinetik*, 10. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008  
ISBN: 978-3-540-68422-0
- [12] Hamm, P.: *Ein Beitrag zum Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Fußgängerbrücken aus Holz*, Dissertation, Technische Universität München, 2003
- [13] Hamm, P.: *Warum Decken zu schwingen beginnen*, Bauen mit Holz, März 2006  
ISSN: 005-6545
- [14] Kreuzinger, H.; Mohr, B.: *Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz*. Abschlussbericht, Technische Universität München, 1999  
ISBN: 3-8167-5487-2
- [15] Hrsg.: Mehlhorn, G.: *Der Ingenieurbau: Grundwissen Mathematik/ Technische Mechanik*, Ernst & Sohn, Berlin, 1999  
ISBN: 3-433-01567-8
- [16] Maldonado, S.A.H., Chui, Y.H.: *Vibrational Performance of Cross Laminated Timber Floors*, Paper WCTE S. 370-377, Auckland New Zealand, 2012
- [17] Ohlsson, S.: *FLOOR VIBRATIONS AND HUMAN DISKOMFORT*, Chalmers University of Technology Göteborg, Göteborg, 1982  
ISBN: 91-7032-077-2
- [18] Ohlsson, S.: *Genzzustände der Gebrauchstauglichkeit - Schwingungen*, In: Arbeitsgemeinschaft Holz e.V. (Hrsg.): *Holzbauwerke, STEP 1: Bemessung und Baustoffe nach Eurocode 5*, Fachverlag Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz e.V., Düsseldorf, 1995 | ISSN: 0446-2114

- [19] Petersen, C.: *Dynamik der Baukonstruktionen*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1996  
ISBN: 3-528-08123-6
- [20] Ringhofer, A.: *Erdbebennormung in Europa und deren Anwendung auf Wohnbauten in Holz-Massivbauweise*, Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2010
- [21] Schickhofer, G.: *Holzbau - Teil A Der Roh- und Werkstoff Holz*, Skriptum, Version 1.2, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, 2006
- [22] Schickhofer, G.; et. al.: *BSPHandbuch Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz*, 2. Auflage, Verlag der technischen Universität Graz, Graz, 2010  
ISBN: 978-3-85125-109-8
- [23] Weckendorf, J.: *Dynamic Response of Structural Timber Flooring Systems*, Dissertation, Edinburgh Napier University, 2009
- [24] Weckendorf, J., et.al.: *Damping Characteristics of Timber Flooring Systems with Respect to Low-Frequency Vibration Modes*, Paper WCTE, Miyazaki Japan, 2008
- [25] Weckendorf, J., Smith, I.: *Dynamic characteristics of shallow floors with cross-laminated-timber spines*, Paper WCTE S. 176-185, Auckland New Zealand, 2012
- [26] Winter, S., Hamm, P., Richter, A.: *Schwingungstechnische Optimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken*, Abschlussbericht, Technische Universität München, 2010

### 3 Bedienungsanleitungen

- [27] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: *Bedienungsanleitung SMU 31 - Schwingungsmessgerät nach DIN 45666 und DIN 45669 (FANAK)*, 571.02-01-4.3, Darmstadt

### 4 Webinhalte

- [28] Eberle, K., Wagner, J.: *Versuchstechnik*, Vorlesungsunterlagen, Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart, 2010  
Quelle: [http://www.isd.uni-stuttgart.de/lehre/diplom/skripte/versuchstechnik/VT\\_K7.pdf](http://www.isd.uni-stuttgart.de/lehre/diplom/skripte/versuchstechnik/VT_K7.pdf) | Stand: 2012-10-14

Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe

S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | F – Forschungsberichte  
V – Vorträge, Tagungen | M – Masterarbeiten

Institutskennzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl