

\_\_\_\_\_  
Name der Forschungsstelle(n)

\_\_\_\_\_  
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

\_\_\_\_\_  
Bewilligungszeitraum

## Schlussbericht für den Zeitraum : \_\_\_\_\_

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

ist beigefügt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift der/des Projektleiter(s)



Schlussbericht zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

## **Schwingungstechnische Optimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken:**

### **Entwicklung von Bemessungs- und Konstruktionsregeln auf der Grundlage eines kalibrierten FEM-Modells und unter Berücksichtigung des Dissipations-Potentials unterschiedlicher Deckenaufbauten**

**Kurztitel:**

Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken

**Englisch:**

Floor vibrations of timber floors and timber composite systems



# Kurzdarstellung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das **Schwingungs- und Dämpfungsverhalten** von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken untersucht, mit dem Ziel den vorhandenen Wissenstand zu ergänzen und auf dieser Basis Konstruktions- und Bemessungsregeln für den sicheren und wirtschaftlichen Gebrauchstauglichkeitsnachweis zur Verfügung zu stellen. Die Ergebnisse wurden durch parallel laufende Messungen (in situ und Labor), Literaturrecherchen und FEM-Berechnungen erarbeitet.

**Messungen in situ** sind erforderlich, um die Ergebnisse aus Labormessungen auf reale Bauwerke übertragen zu können. Mit mehr als 100 in-situ-Messungen in geeigneten Objekten wurde die ursprünglich geplante Anzahl von 30-50 deutlich überschritten. Bei fast allen Messungen wurde eine mehr oder weniger starke Abweichung der gemessenen von der berechneten Eigenfrequenz festgestellt und zwar so, dass die gemessene Frequenz deutlich größer war als die berechnete. Mögliche Ursachen, wie z. B. unberücksichtigte steifigkeitserhöhende Einflüsse des statischen Systems, wie zusätzliche Steifigkeit des Estrichs, elastische Einspannungen, Halterung des freien Randes, Trennwände und Drempe (Aussteifung, Kopplung, Zwischenstützung) wurden durch Laboruntersuchungen oder FEM-Analysen untersucht und quantifiziert.

Ein weiterer Vorteil von **Laboruntersuchungen** resultiert aus der Möglichkeit, die Querschnittswerte und Materialeigenschaften (E, m) genau zu ermitteln. Auf der Grundlage der durchgeführten Literaturrecherche, der in-situ-Messungen und der FEM-Analyse wurde der Versuchsaufbau für die Laboruntersuchungen konzipiert. Die durchgeführten Versuche im Labor umfassen Untersuchungen an einer Holzbalkendecke und an zwei Brettstapeldecken in Kombination mit unterschiedlichen Ausbaukonstruktionen sowie die Untersuchungen zur Biegesteifigkeit und zur Materialdämpfung von Ausbaukonstruktionen. Über den ursprünglich geplanten Untersuchungsumfang hinaus, wurde eine über zwei Felder durchlaufende Brettstapeldecke mit Kragarm untersucht. Abweichend zum beantragten Versuchsprogramm wurde keine dritte Rohkonstruktion in Form von Holz-Beton-Verbund untersucht, da diese Decken in den in-situ-Messungen immer eine gute Beurteilung ihres dynamischen Verhaltens aufwiesen und die im großen Deckenversuchsstand realisierbare Spannweite von 5 m die in situ erzielten Ergebnisse nicht weiter ergänzt.

Zur Systemkontrolle des FEM-Modells wurden die Messergebnisse aus den Labormessungen eingearbeitet. Die **FEM-Analysen** ermöglichten eine detailliertere Überprüfung der Einflüsse der Lagerungsbedingungen, der Masse und der Längs- und Querbiegesteifigkeiten auf das Gesamtsystem. Die Berechnungsergebnisse wurden wiederum mit den Messergebnissen aus der Labormessung und zum Teil mit den Messergebnissen aus den in-situ-Messungen verglichen.

**Ergebnis** des durchgeführten Vorhabens sind Konstruktions- und Bemessungsregeln, die es Tragwerksplanern und ausführenden Firmen ermöglichen, den Nachweis des Schwingungsverhaltens von Holzdecken unter üblicher Wohn- und Büronutzung zu führen. Durch die Bereitstellung von **Konstruktions- und Bemessungsregeln** für den Nachweis des Schwingungsverhaltens im Rahmen des Gebrauchstauglichkeitsnachweises der [DIN 1052] sowie des [Eurocode 5] werden die Wirtschaftlichkeit und die **Planungssicherheit** der KMU (Planer und ausführende Firmen) und gleichzeitig die Attraktivität des Baustoffes Holz erhöht. **„Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.“**

# Vorwort

Das Forschungsvorhaben wurde mit finanzieller Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) Köln aus den Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH) München durchgeführt. Wir danken den Förderern für die Unterstützung und die Hilfe bei der Durchführung der Arbeiten recht herzlich.

Besonderer Dank gilt:

Für die fruchtbare Diskussionen:

- Herrn Walter Bauer, Bauer Holzbau GmbH in Satteldorf-Gröningen
- Herrn Dittrich, Planungsgesellschaft Dittrich mbH, München
- Herrn Eckert, LIGNOTREND Produktions GmbH, Weilheim-Bannholz
- Herrn Fritzen, Bruderverlag
- Herrn Mario Gedak, BDF
- Herrn Peter Jonak, Bien Zenker AG
- Herrn Univ.-Prof. Heinrich Kreuzinger, TU München
- Herrn Jörg Lange, BDF
- Herrn Dr. Bernhard Mohr, Ingenieurbüro Dr.-Ing. Schütz, Kempten
- Frau Dr. Mandy Peter,
- Herrn Prof. Karl Rautenstrauch, Bauhaus-Universität Weimar,
- Herrn Jürgen Schaffitzel, Schaffitzel Holzindustrie GmbH + Co
- Herrn Prof. Ulrich Schanda, Hochschule Rosenheim
- sowie den weiteren Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss

Für die Bereitstellung von Material:

- Herrn Merkle, Merkle Holzbau GmbH in Bissingen für die Bereitstellung und Fertigung der Brettstapeldecken-Elemente für die Schwingungsmessungen im Großen und Kleinen Deckenversuchsstand,

- Herrn Markus Reißmann, LUXHAUS GmbH & Co. KG in Georgensgmünd für die Bereitstellung und Fertigung der Holzbalkendecken-Elemente für die Schwingungsmessungen im Großen Deckenversuchsstand,

Für die Unterstützung bei der Auswahl und zur Verfügung Stellung von Messobjekten sowie den zugehörigen Unterlagen:

- Herrn Walter Bauer, Bauer Holzbau GmbH in Satteldorf- Gröningen sowie die Herstellung des Schwingungssteiges.
- Herrn Manfred Augustin, TU Graz, A
- Herrn Markus Becker, Holzbau Becker & Sohn GmbH in Medebach
- Herrn Günther Eberle, KLH Massivbau GmbH in Dornbirn, A
- Herrn Ralph Eckert, Lignotrend Produktions GmbH
- Herrn Mario Gedak, DFH Deutsche Fertighaus Holding AG in Simmern
- Herrn Prof. Heiner Hartmann, Planungsgesellschaft Dittrich mbH in München
- Herrn Peter Jonak, BienZenker Hausbau GmbH & Co in Michelstadt
- Herrn Markus Leppin, Regnauer Fertigbau GmbH & Co. KG in Seebruck/Chiemsee
- Herrn Ralph Schläpfer, Lignatur AG in Waldstatt, CH
- Herrn Stephan Wisser, Rettenmeier Holzindustrie Hirschberg GmbH & Co. KG in Hirschberg
- Fingerhut Haus GmbH & Co. KG in Neunkhausen
- Schwörer Haus in Hohenstein-Oberstetten

Für die Bereitstellung von Räumlichkeiten für ein Treffen des projektbegleitenden Ausschusses

- TU München
- MFPA Leipzig
- Herrn Walter Bauer, Bauer Holzbau GmbH in Satteldorf- Gröningen

Für die Erlaubnis der Verwendung von Messwerten aus [Hamm/ Richter - BSP, 2009] und [FITZ, 2008]:

- Herrn Univ.-Prof. Gerhard Schickhofer, TU Graz, für die Zustimmung der Verwendung der Messwerte an BSP-Decken, die im Rahmen einer Masterarbeit an der TU Graz [FITZ (2008)] experimentell, numerisch und theoretisch untersucht wurden. Um die Ergebnisse der Finite-Elemente-Methode verifizieren zu können, wurden Schwingungsmessungen im Labor der MFPA Leipzig GmbH unter definierten Randbedingungen durchgeführt und die Materialeigenschaften bestimmt.
- Herrn Mario Fitz für die gute und unkomplizierte Zusammenarbeit während der Messungen an der MFPA Leipzig GmbH.

Für die Herstellung der Versuchsvorrichtungen und die Versuchsdurchführung danken wir den Herren Holger Busch, Robert Herold und Immanuel Wojan, MFPA Leipzig GmbH.

Wir danken allen Beteiligten für Ihre Unterstützung bei der Herstellung der Versuchskörper und ihrem Mitwirken an den Messungen.



3.3.4.3	Grenzwerte nach [Erläuterungen].....	3-10
3.3.4.4	Grenzwerte nach [Eurocode 5].....	3-11
3.3.4.5	Gegenüberstellung von [DIN 1052] und [Eurocode 5] .....	3-11
3.3.5	Begrenzung der Schwingbeschleunigung bzw. der Schwinggeschwindigkeit ....	3-12
3.3.5.1	Allgemeines.....	3-12
3.3.6	Grenzwerte der Schwingbeschleunigung nach [DIN 1052] bzw. [Erläuterungen]... 3-	12
3.3.6.1	Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit nach [Eurocode 5] .....	3-13
3.3.6.2	Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit nach [Kreuzinger / Mohr, 1999] .....	3-14
3.3.6.3	Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit infolge Heeldrop für Vergleich mit Messwerten. 3-14	
3.3.7	Steifigkeitskriterium .....	3-14
3.3.7.1	Allgemeines.....	3-14
3.3.7.2	Grenzwerte nach [DIN 1052] bzw. [Erläuterungen] .....	3-15
3.3.7.3	Variable Grenzwerte nach [Eurocode 5].....	3-16
<b>4</b>	<b>KRITERIEN ZUR (SUBJEKTIVEN) BEWERTUNG DES</b>	
	<b>SCHWINGUNGSVERHALTENS .....</b>	<b>4-1</b>
4.1	Allgemeines.....	4-1
4.2	Empfindlichkeit des Menschen gegenüber Schwingungen.....	4-1
4.3	Entwicklung Bewertungsschema.....	4-3
4.4	Schwingungssteg bei der Firma Bauer Holzbau GmbH.....	4-3
4.5	Ergebnis .....	4-6
<b>5</b>	<b>IN-SITU-MESSUNGEN .....</b>	<b>5-1</b>
5.1	Allgemeines.....	5-1
5.2	Messtechnik .....	5-1
5.3	Anregung und Ablauf der Messungen.....	5-2
5.4	Übersicht über die gemessenen Objekte und Decken .....	5-2
5.5	Bezeichnungssystematik für in-situ-Messungen .....	5-4
5.6	Ausgewählte Beispiele und Einflüsse auf die Amplituden.....	5-5
5.7	Ergebnisse .....	5-10
<b>6</b>	<b>LABORUNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>6-1</b>
6.1	Allgemeines.....	6-1
6.2	Großer Deckenversuchsstand.....	6-2
6.2.1	Allgemeines.....	6-2
6.2.2	Versuchsstand und zweiseitige Lagerung.....	6-2
6.2.3	Messtechnik .....	6-3
6.2.4	Anregung.....	6-4
6.2.5	Bezeichnungssystematik für Labor-Messungen.....	6-6
6.2.6	Versuchskörper .....	6-6
6.2.6.1	Holzbalkendecke Pos. L .....	6-7
6.2.6.2	Brettstapeldecke .....	6-8

6.2.6.3	Brettsperrholzplatte.....	6-9
6.2.7	Versuchsprogramm .....	6-10
6.2.8	Lagerungsvarianten und Statische Systeme.....	6-11
6.2.8.1	Zweiseitige Lagerung.....	6-11
6.2.8.2	Vierseitige Lagerung.....	6-12
6.2.8.3	D - Rohdecken als Durchlaufträgersystem .....	6-12
6.2.8.4	Randeinspannung.....	6-13
6.2.9	Ausbauvarianten .....	6-15
6.2.9.1	Material.....	6-15
6.2.9.2	0 - Rohdecken .....	6-17
6.2.9.3	SCH - Splittschüttung auf Holzbalken-Rohdecke L-SCH.....	6-17
6.2.9.4	TES - Schwimmender Trockenestrich auf Schüttung (L-TES, BK-TES und BSP-TES).....	6-17
6.2.9.5	NES - Schwimmender Nassestrich auf Schüttung (L-TES, BK-TES und BSP-TES).....	6-18
6.2.9.6	NE - Schwimmender Nassestrich ohne Schüttung (L-NE und BK-NE).....	6-19
6.2.9.7	TE - Schwimmender Nassestrich ohne Schüttung (L-NE und BK-NE) .....	6-19
6.2.9.8	UF - Unterhangdecke an Federschienen (UF).....	6-19
6.2.9.9	UL - Holzbalkendecke mit schwimmendem Trockenestrich auf Schüttung und Unterhangdecke auf Lattung (UL).....	6-19
6.2.9.10	Teppich.....	6-19
6.2.10	Ergebnisse / Messwerte .....	6-20
6.3	Biegesteifigkeit von Ausbaukonstruktionen .....	6-23
6.3.1	Allgemeines.....	6-23
6.3.2	Versuchsstand.....	6-23
6.3.3	Messtechnik .....	6-24
6.3.4	Versuchskörper .....	6-26
6.3.5	Versuchsprogramm .....	6-26
6.3.6	Ergebnisse .....	6-28
6.3.7	Auswertung .....	6-28
6.4	Dynamische Steifigkeit bzw. Verlustfaktor (Materialdämpfung) .....	6-31
6.4.1	Allgemeines.....	6-31
6.4.2	Messverfahren.....	6-31
6.4.3	Versuchsprogramm .....	6-32
6.4.4	Messergebnisse .....	6-33
6.4.4.1	Messung mit Shaker .....	6-33
6.4.4.2	Messung mit Impulshammer.....	6-34
6.4.5	Auswertung .....	6-34
6.5	Materialkennwerte Anhydrit- Estrich.....	6-35
6.6	Materialkennwerte Elastomerlager .....	6-36
6.7	Materialkennwerte Trittschalldämmung.....	6-36
6.8	Materialkennwerte Holzbalken .....	6-36
<b>7</b>	<b>FINITE ELEMENTE METHODE.....</b>	<b>7-1</b>
7.1	Allgemeines.....	7-1
7.2	Modellfindung und erste Ergebnisse .....	7-1

7.3	Vergleich der berechneten mit den gemessenen Frequenzen.....	7-2
7.4	Parameterstudien .....	7-2
7.5	Ergebnis .....	7-4
<b>8</b>	<b>AUSWERTUNG UND VERGLEICH DER MESSUNGEN IN SITU, IM LABOR SOWIE DER BERECHNUNGEN .....</b>	<b>8-1</b>
8.1	Allgemeines .....	8-1
8.2	Untersuchung mit dem „Solver“ [Excel].....	8-1
8.2.1	Beschreibung Modelle und zugehörige Ergebnisse .....	8-1
8.2.2	Schlussfolgerungen aus der Auswertung mit dem „Solver“ .....	8-5
8.2.3	Auswertung mit dem „Solver“ getrennt nach vier Konstruktionstypen.....	8-6
8.2.3.1	Aufteilung in vier Konstruktionstypen:.....	8-6
8.2.3.2	Eingabeparameter für Solver.....	8-6
8.2.4	Ergebnisse aus dem "Solver" .....	8-15
8.2.5	Hinweise zur Berechnung .....	8-16
8.2.6	Schlussfolgerungen aus der Auswertung mit dem „Solver“ getrennt nach vier Konstruktionstypen.....	8-17
8.2.7	Auswertung nach „Parametern“ .....	8-17
8.2.7.1	Allgemeines .....	8-17
8.2.7.2	Steifigkeit und Frequenz .....	8-17
8.3	Auswertung .....	8-18
8.3.1	Auswertung "Solver".....	8-18
8.3.2	Einfluss der Anregung.....	8-18
8.3.2.1	Anregung von unten → Eigenfrequenzen.....	8-18
8.3.2.2	Heeldrop → Dämpfung .....	8-20
8.3.2.3	Gehen → Beschleunigung.....	8-21
8.3.2.4	Sandsack → Beschleunigung.....	8-21
8.3.2.5	Schwingungserreger (Shaker).....	8-22
8.3.2.6	Ball und Auslenkung.....	8-22
8.3.3	Subjektive Bewertung .....	8-23
8.3.4	Leichte Deckenkonstruktionen .....	8-23
8.3.5	Trennwände .....	8-25
8.3.6	Estrich / Horizontale Boden- und Deckenaufbauten / Ausbau .....	8-25
8.3.7	Mitschwingende Breite / beff.....	8-25
8.3.8	Tragverhalten in Querrichtung / Querbiegesteifigkeit.....	8-26
8.3.9	Mitschwingende Masse / Fläche / Raumgröße .....	8-26
8.3.10	Einflüsse aus der Randeinspannung .....	8-26
8.3.11	Einflüsse auf die Eigenfrequenz aus nachgiebiger Lagerung / seitlicher Lagerung 8- 26	
8.3.12	Dämpfung:.....	8-27
8.3.12.1	Auswertung im Forschungsvorhaben .....	8-27
8.3.12.2	Dämpfung Holzbalkendecke (Großer Deckenversuchsstand).....	8-28
8.3.12.3	Dämpfung infolge von Ausbaukonstruktionen (Abschnitt 6.4) .....	8-30

8.3.12.4 Dämpfung Holzbalken aus Abschnitt 6.6 .....	8-30
8.3.12.5 Dämpfungswerte über Verlustfaktor .....	8-31
8.3.12.6 Dämpfungswerte in-situ-Messungen .....	8-31
8.3.12.7 Dämpfungswerte Literatur .....	8-32
8.4 Neue Erkenntnisse bzw. Thesen.....	8-33
8.5 Zusammenfassung .....	8-33
<b>9 KONSTRUKTIONS- UND BEMESSUNGSREGELN.....</b>	<b>9-1</b>
9.1 Allgemeines .....	9-1
9.2 Vorschläge von Bemessungs- und Konstruktionsregeln mit Anwendungsgrenzen für Wohnungs- und Bürodecken .....	9-1
9.2.1 Konstruktive Anforderungen.....	9-3
9.2.2 Frequenzkriterium .....	9-4
9.2.3 Genauere Untersuchung .....	9-6
9.2.4 Steifigkeitskriterium .....	9-8
9.2.5 Ermittlung der Querbiegesteifigkeit für Steifigkeits- und Frequenzkriterium .....	9-10
9.3 Anwendungsgrenzen und Hinweise zum Bemessungsvorschlag .....	9-11
9.3.1 Lagerung auf nachgiebigem Unterzug .....	9-11
9.3.1.1 Berücksichtigung der Nachgiebigkeit von Unterzügen sowohl bei der Berechnung der Eigenfrequenz $f_e$ als auch bei der Berechnung der Durchbiegung unter Einzellast.....	9-11
9.3.1.2 Statisches und dynamisches Ersatzsystem:.....	9-12
9.3.1.3 Mindeststeifigkeit .....	9-13
9.3.1.4 Anwendung der Überlagerungsformel nach Dunkerley .....	9-14
9.3.1.5 Holzträger als Durchlaufträger:.....	9-15
9.3.1.6 Bemessungssituation im Stahlbau.....	9-16
9.3.1.7 Grenzwerte .....	9-17
9.4 Zusammenfassung Bemessungsvorschlag (Kurzübersicht) .....	9-18
<b>10 BEMESSUNGSBEISPIELE .....</b>	<b>10-1</b>
10.1 Decke aus BSP .....	10-1
10.1.1 Statisches System.....	10-1
10.1.2 Eigenfrequenz .....	10-2
10.1.3 Durchbiegung unter Einzellast von 2 kN oder Steifigkeitskriterium.....	10-3
10.1.4 Konstruktive Anforderungen an den Aufbau der Decke .....	10-4
10.1.5 Subjektive Einschätzung der Decke .....	10-4
<b>11 ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>11-1</b>
<b>12 AUSBLICK UND ABGRENZUNG .....</b>	<b>12-1</b>
<b>13 LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>13-1</b>
13.1 Literatur .....	13-1
13.2 Regelwerke .....	13-4
13.3 Software .....	13-5

<b>14</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>14-1</b>
<b>15</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>15—1</b>

**Anhang A** Literaturrecherche

**Anhang B** Zusammenstellung der Messergebnisse

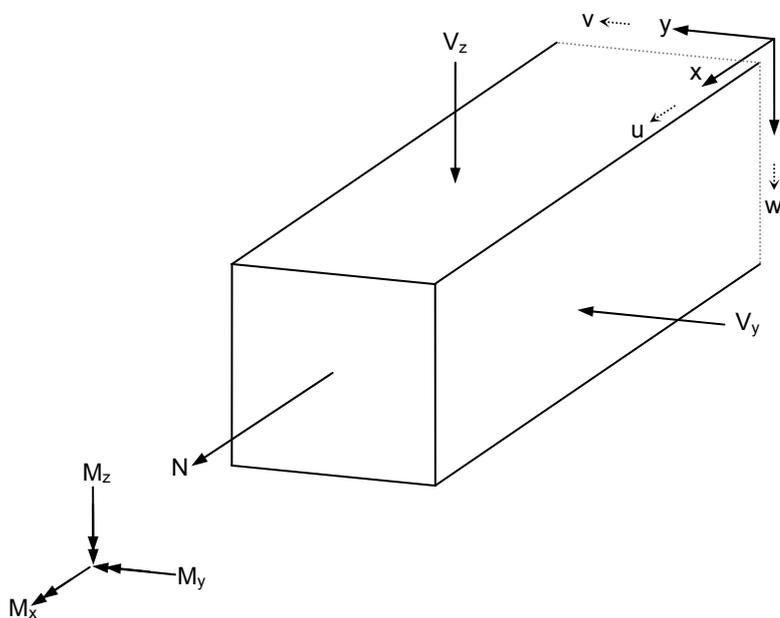
**Anhang C** Großer Deckenversuchsstand

**Anhang D** Untersuchungen zum Verlustfaktor / zur dyn. Steifigkeit

**Anhang E** Flankierende Untersuchungen im Labor

# Bezeichnungen

## Achsen und Schnittgrößen



## Griechische Buchstaben

$\Delta$	Änderung, Differenz
$\Lambda$	Logarithmisches Dämpfungsdekrement
$\Psi$	Kombinationsbeiwert
$\alpha$	Fourierkoeffizient; Beiwert für die rechnerische Berücksichtigung der Plattentragwirkung
$\varphi$	Phasenverschiebung
$\gamma$	Teilsicherheitsbeiwert; Verbundgrad; Scherungen
$\eta$	Frequenzverhältnis
$\rho$	Rohdichte
$\omega$	Eigenkreisfrequenz [rad/s]

### Lateinische Buchstaben

<i>A</i>	Bezugsfläche; Querschnittsfläche
<i>C</i>	Symbol für die Festigkeitsklasse (Normalbeton, Holz); Federsteifigkeit; Verschiebungsmodul
<i>D</i>	Lehr'sches Dämpfungsmaß
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
<i>F</i>	Kraft; Einzellast [kN]
<i>G</i>	Schubmodul; Ständige Beanspruchung
<i>GI</i>	Bezeichnung der Festigkeitsklasse von Brettschichtholz
<i>I</i>	Flächenmoment zweiten Grades, Impuls
<i>K</i>	Federsteifigkeit [N/m]
<i>M</i>	Biegemoment; Masse [kg]
<i>P</i>	Impuls [Ns]
<i>Q</i>	veränderliche Einwirkung
<i>R</i>	Viskose Dämpfung [Ns/m]
<i>S</i>	Schwerpunkt; Elastizitätszahlen
<i>T</i>	Eigenschwingzeit = Periodendauer [s]
<i>V</i>	Vergrößerungsfunktion, Vergrößerungsfaktor
<i>a, <math>\ddot{w}</math></i>	Beschleunigung; Hebelarm der inneren Kräfte
<i>b</i>	Breite
<i>d</i>	Durchmesser stiftförmiger Verbindungsmittel; Dicke
<i>F</i>	Frequenz [1/s]
<i>g</i>	Eigenlast, ständige Einwirkung
<i>h</i>	Höhe
<i>k</i>	Verbindungssteifigkeit
<i>l</i>	Länge
<i>m</i>	Flächenbezogene Masse [kg/m <sup>2</sup> ] oder linienbezogene Masse [kg/m]
<i>n</i>	Anzahl
<i>p</i>	Verkehrslast
<i>q</i>	Veränderliche Einwirkung; Gleichstreckenlast, Summe der Einwirkungen
<i>s</i>	Abstand der Verbindungsmittel
<i>t</i>	Zeit [s]
<i>u</i>	Holzfeuchte; Verformungsgröße in x-Richtung
<i>v, <math>\dot{w}</math></i>	Geschwindigkeit
<i>w</i>	Schwingweg; Durchbiegung in z-Richtung
<i>x; y</i>	Koordinaten; Achsenbezeichnungen

**Indizes**

<i>C</i>	Beton (concrete)
<i>M</i>	infolge Momentenwirkung; Material
<i>N</i>	unter Normklima ermittelte Werkstoffeigenschaften; infolge Normalkraftwirkung
<i>T</i>	Holz bzw. Holzwerkstoff (timber)
<i>a</i>	Anregungs-
<i>ax</i>	axial (zentrisch)
<i>c</i>	Druck
<i>cube</i>	Würfel (150 mm Kantenlänge)
<i>cyl</i>	Zylinder (h = 300 mm, d = 150 mm)
<i>d</i>	Bemessungswert, Wert unter Berücksichtigung der Dämpfung
<i>def</i>	Verformung
<i>dyn</i>	dynamisch
<i>e</i>	Eigen-
<i>eff</i>	wirksam
<i>exp</i>	experimentell ermittelt
<i>ges</i>	Gesamtwert
<i>global</i>	global
<i>i</i>	Laufvariable
<i>j</i>	Fuge (joint)
<i>k</i>	charakteristischer Wert
<i>längs</i>	In Längsrichtung
<i>m</i>	Biegung
<i>max</i>	lokales Maximum der Zeigergröße
<i>mean</i>	mittlerer Wert
<i>min</i>	kleinster Wert
<i>mod</i>	Modifikation
<i>nom</i>	Nennwert
<i>perm</i>	ständig
<i>quer</i>	In Querrichtung
<i>rech</i>	rechnerisch ermittelt
<i>rel</i>	bezogen
<i>ser</i>	Gebrauchszustand
<i>stat</i>	statisch
<i>t</i>	Zug (tension)
<i>u</i>	Grenz- (ultimate)
<i>y</i>	Fließ-
<i>x, y, z</i>	in x Richtung, in y Richtung, in z Richtung

1 ; 2 Teilquerschnitt 1 ; Teilquerschnitt 2

### Beispiele

$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert des Materials
$f_a$	Anregungsfrequenz [Hz] oder [1/s]
$f_e$	Eigenfrequenz [Hz] oder [1/s]
$f_{e,exp}$	experimentell ermittelte Eigenfrequenz [Hz] oder [1/s]
$f_{ck}$	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit 5 % Quantile
$f_{ck,cube}$	charakteristische Würfeldruckfestigkeit (150 mm Kantenlänge)
$W_{dyn}$	dynamische Durchbiegung
$W_{stat}$	statische Durchbiegung

Alle Maßangaben in Zeichnungen erfolgen in [mm]

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation zum Forschungsvorhaben

Durch den modernen Holzbau stehen Holzwerkstoffe und Holz-Beton-Verbund-Konstruktionen zur Verfügung, mit denen fast beliebige Grundrisse im Büro-, Verwaltungs-, Bildungs- und Wohnungsbau wirtschaftlich realisiert werden können. Die in diesen Bereichen erforderlichen großen Spannweiten beeinflussen jedoch meist negativ das Schwingungsverhalten der Decken. Gleichzeitig sind die Komfortansprüche der Nutzer und damit die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit gestiegen – schon ein leichtes Schwingen der Decke wird als Mangel empfunden.

Damit rückt das **Vermeiden unangenehmer Schwingungen**, ausgelöst z.B. durch das Begehen oder das Herumtoben von Kindern, bei der Bemessung im Neubau wie auch bei der Sanierung von Altbauten in den Vordergrund. Diese Entwicklung – verursacht durch größere realisierbare Spannweiten und eine Erweiterung der Einsatzgebiete für Holzkonstruktionen – spiegelt sich auch in der aktuellen Normung wider. In [DIN 1052] in der Fassung von August 2004 wurde ein entsprechender Gebrauchstauglichkeitsnachweis auf der Grundlage einer Durchbiegungsbeschränkung eingefügt, um das Verhalten von Decken unter personeninduzierten Schwingungen bereits während der Planungsphase abschätzen zu können.

In den zugehörigen [Erläuterungen] wurde ein umfangreiches Kapitel zu diesem Thema aufgenommen. Die hier angeführten genaueren Schwingungsnachweise berücksichtigen Systemparameter wie Eigenfrequenz, Dämpfung, Masse und mitschwingende Breite für ausgewählte Anwendungsfälle. Die in der Praxis vorkommenden Systeme und Aufbauten sind jedoch so vielfältig, dass die für Planer benötigten **Konstruktions- und Bemessungsregeln** – weil damals noch nicht bekannt – nicht vollständig enthalten sind. Obwohl der Schwingungsnachweis oft bemessungsrelevant ist, gibt es dennoch immer wieder **Klagen seitens der Bauherren** bzw. der Nutzer über unangenehm empfundene, die Gebrauchstauglichkeit einschränkende Schwingungen der Decken. Bei eigenen Voruntersuchungen von ausgeführten Decken wurde festgestellt, dass die tatsächlichen dynamischen Eigenschaften oft deutlich von den vereinfachten rechnerischen Annahmen abweichen. Dabei wurden Abweichungen in beide Richtungen vorgefunden, deren Ursachen ermittelt wurden. Ziel ist dabei die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Ein Ziel des Forschungsvorhabens war die Untersuchung und Erschließung vorhandener **Reserven**, die z.B.

- aus der Steifigkeit und dem Dissipationspotential üblicher Fußbodenaufbauten (z.B. schwimmender Estrich, Unterhangdecke) oder
- aus anderen konstruktiven Randbedingungen (Halterung des freien Plattenrandes)

resultieren, für die Bemessung.

Ein weiteres wichtiges Ziel ist die Herstellung der Verknüpfung zwischen subjektiver Bewertung des Schwingungsverhaltens und den Systemkenngrößen.

## 1.2 Inhalt des Forschungsvorhabens

Abbildung 1-1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Arbeitsschritte und deren Zusammenhänge. Im Rahmen des Vorhabens wurden die folgenden Schwerpunkte bearbeitet, die sich zum Teil gegenseitig beeinflussten und damit zeitlich parallel abliefen:

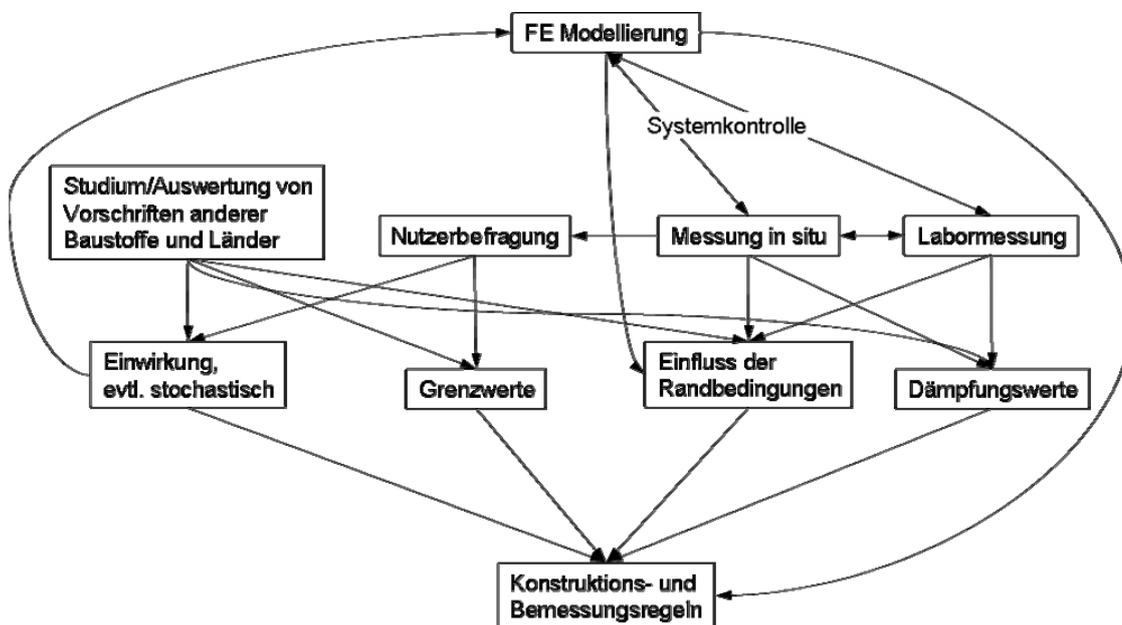


Abbildung 1-1  
Arbeitsschritte und deren Zusammenhänge

## 1.2.1 Arbeitsschritte

### AS 1 Auswertung Literatur

- Auswertung von Regelwerken anderer Baustoffe und Länder (Dämpfungswerte, die jeweils angesetzte Anregung, wie Personen, Maschinen, Impuls und statische Last, Grenzwerte für den Schwingungsnachweis bei Büroräumen)
- Systematische Zusammenstellung von Modellen zur Erfassung personeninduzierter Schwingungen im In- und Ausland.
- Aufbereitung für Planer
- Ergebnisse der Zusammenstellung sind in **Anhang A** angegeben. Hier wurden auch Hinweise auf die Dämpfungswerte sowie eine Übersicht über Grenzwerte für den Schwingungsnachweis bei Büroräumen zusammengestellt.

### AS 2 FEM- Analyse:

- Modellbildung und Überprüfung des Einflusses der Lagerungsbedingungen, Änderung der Steifigkeiten und Massen sowie Ausbaukonstruktionen mit Hilfe des Programms [ANSYS].
- Zur Systemkontrolle wurden die Messergebnisse aus den Labormessungen zum Einfluss der Lagerungsbedingungen und der Quersteifigkeit in das FEM-Modell eingearbeitet.
- Eine Systemkontrolle des FEM-Modells wurde erforderlich, weil relativ viele unbekannte Parameter im Modell vorhanden sind.

### AS 3 Messungen in situ und Nutzerbefragung

- Messungen in situ wurden erforderlich, um die Ergebnisse aus Labormessungen auf reale Bauwerke übertragen zu können.
- Geplant waren ca. 30 bis 50 in-situ-Messungen in geeigneten Objekten. Nach Auswertung dieser Anzahl an Messungen wurde deutlich, dass noch zusätzliche Messungen erforderlich waren. Mittlerweile umfasst die Datenbasis 130 Messungen.
- Als Anregung, zusätzlich zu den Personen kam in Gebäuden mit Treppenhäusern nur der Sandsack in Frage, da der Shaker oder Schwingungserreger nicht mit vertretbarem Aufwand transportiert werden konnte.
- Ermittlung der Eigenfrequenz, der Dämpfung, der Schwingungsantwort (Geschwindigkeit und Beschleunigung) Die Dämpfung wurde nach Anregung mit dem Sandsack oder der Heeldrop über die Ausschwingkurve, vgl. Kapitel 5, berechnet.
- subjektive Einschätzung der Schwingungen infolge des Sandsacks und infolge umhergehender Personen durch die Testpersonen sowie Befragung der Nutzer (falls die Decke schon genutzt wurde)

### AS 4 Labormessungen im Versuchsstand (vgl. Anhang C )

- Labormessungen wurden zusätzlich erforderlich, da bei Messungen in situ Überlagerungseffekte aus unterschiedlichen, gleichzeitig vorhandenen Ausbaukonstruktionen und nicht erfassbare Randbedingungen vorhanden sind. Bei Labormessungen waren sowohl der Aufbau als auch die Lagerungsbedingungen genau bekannt und konnten variiert werden.
- Im „Großen Deckenversuchsstand“ wurden Holzbalken und Brettstapel-Elemente eingebaut. Die Messungen erfolgten am Einzelbauteil (Holzbalken, Brettstapелеlement), an der Rohbaudecke sowie für unterschiedliche Ausbaustufen (schwimmender Nass- und Trockenestrich, Unterhangdecke, Variation des Trittschalldämm-Materials).

- Aus Kostengründen konnten nicht alle verfügbaren Ausbausysteme (Unterhangdecken und Estrich-Schichten) im „Großen Deckenversuchsstand“ eingebaut und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Querbiegesteifigkeit und die Dämpfung der Decke experimentell untersucht werden. Wesentliche Eigenschaften, wie die dynamische Steifigkeit und die Querbiegesteifigkeit wurden daher mit weniger aufwändigen Versuchsaufbauten ermittelt und anschließend bewertet.
- Zur Ermittlung des Einflusses der Lagerungsbedingungen und des Einflusses der Quersteifigkeit auf die mitschwingende Breite wurden im „Großen Deckenversuchsstand“ die Schwingungsantworten der Decken unter Variation der Deckenbreiten, des Einspanngrades sowie der wahlweisen Halterung des freien Plattenrandes ermittelt.

#### AS 5 Konstruktions- und Bemessungsregeln

- Ermittlung objektivierter Grenzwerte für ein „Komfortkriterium“
- Entwicklung und Verifizierung von Konstruktions- und Bemessungsregeln zur Erfassung personeninduzierter Schwingungen in Abhängigkeit von der Nutzung u. a. variabler Randbedingungen
- Aufbereitung der Konstruktions- und Bemessungsregeln mit allen notwendigen Angaben und Formeln für die „übliche Nutzung“ auf einer Doppelseite für den Planer

## 1.3 Definitionen

### 1.3.1 Definition der behandelten Holz- und Holz-Beton-Verbund-Bauweisen, Vorschlag für Bezeichnungssystematik:

#### ▪ **Verbundkonstruktion bzw. Verbunddecke**

Der Begriff „Verbundkonstruktionen“ ohne weitere Zusätze wird in der Praxis häufig gleichgesetzt mit „Stahlbauteile im Verbund mit Beton“.

Im vorliegenden Bericht soll der ohne weitere Zusätze gebrauchte Begriff „Verbundkonstruktion“ als Synonym für Holz- bzw. Holzwerkstoff-Beton-Verbund-Konstruktion stehen. Werden andere Komponenten miteinander kombiniert, so wird dies explizit durch einen Zusatz bezeichnet.

#### ▪ **Brettstapel**

Im vorliegenden Bericht soll der ohne weitere Zusätze gebrauchte Begriff „Brettstapel“ als Oberbegriff über alle Arten von miteinander kraftschlüssig verbundenen Lamellen dienen. Gemeinsam ist allen Brettstapelelementen, dass die Lamellen hochkant beansprucht werden. In Abhängigkeit von der Art der Herstellung werden die folgenden Begriffe unterschieden:

**genagelter Brettstapel**

Flächiges Holzelement, bestehend aus miteinander vernagelten Lamellen. In der Praxis auch umgangssprachlich mit „Brettstapel“ oder „Brettstapelelement“ bezeichnet, da dies die ursprüngliche Variante war, um einzelne dünne Bretter und Schwarzhölzer zu einem größeren Holzquerschnitt zusammenzufassen und damit zu „veredeln“.

**geklebter Brettstapel**

Flächiges Holzelement aus Brettschichtholz. In der Praxis auch umgangssprachlich mit „Leimholz“ bezeichnet. Nach neuer Nomenklatur der [DIN 1052] ist jedoch der Begriff „Leim“ durch „Klebstoff“ zu ersetzen.

**Dübelholz bzw. gedübelter Brettstapel**

Flächiges Holzelement, bestehend aus nebeneinander stehenden Holzlamellen, die untereinander durch Hartholzdübel verbunden sind.

**▪ Holzwerkstoff**

Plattenförmiges Holzelement, bestehend aus industriell bearbeiteten Holzprodukten mit vom Massivholz abweichenden mechanischen Eigenschaften. Mögliche Ausführungen sind Furnierschichtholz, Sperrholz, Kreuzlagenholz, Furnierstreifenholz, u.a.

**BSP bzw. CLT**

Brettsperrholz (BSP) bzw. cross laminated timber (CLT)

**KLH**

Kreuzlagenholz

**▪ Ausbau / Aufbau / Ausbaukonstruktion**

Als Aufbau bzw. Ausbaukonstruktionen werden Fußbodenschichten, wie z.B. schwimmend gelagerter Estrich, Trittschalldämmung und Unterhangdecken bezeichnet. Der Einfluss leichter (nichttragender) Trennwände wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens immer wieder festgestellt aber nicht näher untersucht.

**▪ Rohdecke / Rohkonstruktion**

Rohkonstruktion heißt die reine Tragkonstruktion ohne weiteren Aufbau.

### 1.3.2 Systematik für subjektive Bewertung

Zur subjektiven Bewertung des Empfindens des Schwingungsverhaltens einer Decke durch den Nutzer wurde das in Tabelle 1-1 dargestellte Bewertungsschema in Anlehnung an den Forschungsbericht von [Kreuzinger/ Mohr, 1999] verwendet. Infolgedessen konnten die in diesem Forschungsvorhaben untersuchten und bewerteten Decken mit in die vorliegende Auswertung einbezogen werden. Wörtlich übersetzt sind Schwingungen und Vibrationen gleich. Im Rahmen dieses Berichts und des erwähnten Vorgängerberichts werden mit Vibrationen hochfrequente Schwingungen bezeichnet.

Tabelle 1-1 Bewertungskriterien (subjektiv) nach [Kreuzinger/ Mohr, 1999]

Bewertung	1	2	3	4
Beschreibung in Worten	Schwingungen kaum spürbar	Schwingungen spürbar, wenn man sich darauf konzentriert	Schwingungen (und/oder Vibrationen) spürbar	Schwingungen (und/oder Vibrationen) deutlich spürbar
Bewertung in Worten	nicht störend	nicht störend	zum Teil störend	Störend / unangenehm

## 1.4 Versuchsprogramm

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Messungen in situ und im Labor durchgeführt. Alle experimentellen Untersuchungen wurden an der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig) mit ihrer zertifizierten Schallprüfstelle durchgeführt (Abbildung 1-2 f.).

Die MFPA Leipzig ist Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle nach Landesbauordnung (SAC 02) sowie Bauproduktengesetz (NB 0800) und Teil der Forschungseinrichtungen der Universität Leipzig.

Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche gibt Tabelle 1-2.



Abbildung 1-2  
Großer Deckenversuchsstand in der großen  
Versuchshalle der MFPA Leipzig



Abbildung 1-3  
E-Modulbestimmung für Estrich, MFPA Leipzig

Tabelle 1-2 Übersicht über im Labor durchgeführte Versuche

Versuche	Anz.	Untersuchungsmethode
Großer Deckenversuchsstand		Messen des Weges in Abhängigkeit von der Zeit nach Auslenkung der Versuchskörper, Auswertung der Messdaten zur Ermittlung von Eigenfrequenz, Dämpfung und Schwinggeschwindigkeit
Kleiner Deckenversuchsstand	10	Querbiegesteifigkeit von Ausbaukonstruktionen und Messen des Weges in Abhängigkeit von der Zeit nach Auslenkung der Versuchskörper, Auswertung der Messdaten zur Ermittlung von Eigenfrequenz, Dämpfung und Schwinggeschwindigkeit Variation der Auflagermaterialien
Dynamische Steifigkeit	9	Dynamische Steifigkeit $s'$ nach [DIN EN 29 052-1]
Ermittlung der Eigenschaften von Holz und Brettstapel		Holzfeuchtemessung nach [DIN EN 13 183-2] Rohdichte nach [DIN EN 52 182] Elastizitäts-Modul nach [DIN EN 408],
Bestimmung der Eigenschaften des Estrichs		Druck- und Zylinderdruckfestigkeit, E-Modul nach [DIN 1048-5], Feuchtemessung zur Ermittlung der Belagsreife



## 2 Grundlagen der Baudynamik

### 2.1 Der lineare Einmassenschwinger

Das einfachste mechanische System zur Beschreibung von Schwingungen ist der lineare Einmassenschwinger, vgl. Abbildung 2-1. Er besteht aus einer Masse  $M^*$ , einer Feder  $K^*$  und, im gedämpften Fall, einer Dämpfung  $R$ . Die Dämpfungskraft  $R \cdot \dot{w}$  wird viskos angenommen, d. h. der momentanen Geschwindigkeit  $\dot{w}$  proportional. Im Falle einer erzwungenen Schwingung wirkt die zeitlich veränderliche, harmonische Kraft  $F(t)$  mit  $F(t) = F_0 \cdot \cos \Omega t$  auf den Schwinger und führt zu einer Verschiebung  $w(t)$ . Die Eigenfrequenz wird nach Gleichung 2-1 berechnet, welche im Folgenden hergeleitet wird.

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K^*}{M^*}}$$

Gleichung 2-1

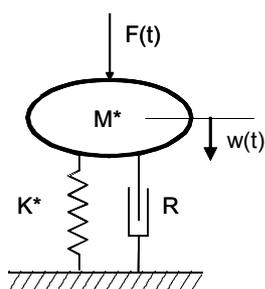


Abbildung 2-1  
Einmassenschwinger

Der Unterschied zwischen einer statischen und einer dynamischen Berechnung ist, dass bei der Bildung des Kräftegleichgewichts für die dynamische Berechnung zusätzlich zu den statischen Kräften auch die d'Alembert'schen Trägheitskräfte, hier  $M^* \cdot \ddot{w}$ , angesetzt werden und dass sowohl die Einwirkung als auch die Reaktion von der Zeit abhängig sind. So führt das kinetische Kräftegleichgewicht am System des linearen, gedämpften Einmassenschwingers zu folgender Differentialgleichung der gedämpften, erzwungenen Schwingung unter harmonischer Anregung:

$$M^* \cdot \ddot{w} + R \cdot \dot{w} + K^* \cdot w = F_0 \cdot \cos \Omega t$$

Gleichung 2-2

### 2.1.1 Die freie, ungedämpfte Schwingung

Im einfachsten Fall sind sowohl die Einwirkung als auch die Dämpfung beim Einmassenschwinger gleich Null. Man spricht dann von der freien, ungedämpften Schwingung. Gleichung 2-3 wird dann auf eine homogene Differentialgleichung reduziert.

$$M^* \cdot \ddot{w} + K^* \cdot w = 0 \quad \text{Gleichung 2-3}$$

Der Lösungsansatz lautet:

$$w(t) = A_1 \cdot \sin \omega t + A_2 \cdot \cos \omega t = w_0 \cdot (\sin \omega t - \varphi_0) \quad \text{Gleichung 2-4}$$

mit Eigenkreisfrequenz

$$\omega = 2\pi \cdot f_e = \sqrt{\frac{K^*}{M^*}} \quad [1/s] \quad \text{Gleichung 2-5}$$

Federsteifigkeit  $K^*$   $[N/m]$   
 Masse  $M^*$   
 Eigenschwingzeit = Periodendauer

$$T = \frac{1}{f_e} \quad [s] \quad \text{Gleichung 2-6}$$

Eigenfrequenz	$f_e$ in $[1/s]$
Auslenkung zur Zeit $t=0$	$w(0) = A_2$ in $[m]$
Geschwindigkeit zur Zeit $t=0$	$\dot{w}(0) = A_1 \cdot \omega$ in $[m/s]$
Amplitude der freien Schwingung	$w_0$ in $[m]$
Nullphasenwinkel	

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{A_2}{w_0} \quad [rad] \quad \text{Gleichung 2-7}$$

Wenn die Anfangsbedingungen Auslenkung  $w(0)$  und Geschwindigkeit  $\dot{w}(0)$  zur Zeit  $t = 0$  bekannt sind, ist auch die Gleichung für die Schwingung (Gleichung 2-4) bekannt.

Für diesen Einmassenschwinger wird eine Energiebetrachtung angestellt [Eibl, 1997]. Beim freien, ungedämpften Schwinger muss die Summe aus potentieller und kinetischer Energie stets konstant sein.

$$E_{kin} = E_{pot} \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot M^* \cdot \dot{w}^2 = \frac{1}{2} \cdot K^* \cdot w^2 \Rightarrow M^* \cdot \omega^2 \cdot w^2 = K^* \cdot w^2 \quad \text{Gleichung 2-8}$$

$$\Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{K^*}{M^*}}, \text{ vgl. Gleichung 2-5.}$$

Bezeichnet man die statische Auslenkung der Feder unter dem Gewicht der Masse  $M$  mit  $w_{stat}$ , so gilt

$$w_{stat} = \frac{M^* \cdot g}{K^*} \text{ und } M^* = \frac{w_{stat} \cdot K^*}{g}, \quad \text{Gleichung 2-9}$$

mit  $g = 9,81 \text{ m/s}^2 = \text{Erdbeschleunigung}$

Eingesetzt in die Frequenzgleichung (Gleichung 2-5) erhält man einen direkten Zusammenhang zwischen der Durchbiegung unter Eigenlast  $w_{stat}$  und der Eigenfrequenz  $f_e$ :

$$f_e = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K^*}{M^*}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K^* \cdot g}{w_{stat} \cdot K^*}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{w_{stat}}} \cong \frac{5}{\sqrt{w_{stat} [\text{cm}]}} \quad \text{Gleichung 2-10}$$

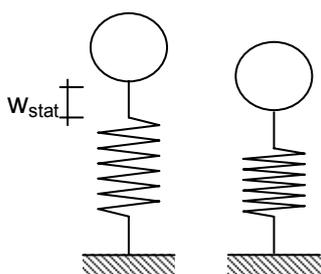


Abbildung 2-2  
Statische Auslenkung beim Einmassenschwinger

### 2.1.2 Die freie, gedämpfte Schwingung

Der Fall der ungedämpften Schwingung existiert nur in der Theorie. In der Praxis werden die Bewegungen des Schwingers durch innere und/oder äußere Reibungsmechanismen gedämpft. Energie wird dissipiert, d. h. zerstreut. Hierdurch klingt die freie Schwingung ab und das System kommt in der statischen Gleichgewichtslage zur Ruhe. Wie oben erwähnt, wird von einer viskosen Dämpfung  $R$  [ $Ns/m$ ] ausgegangen. Diese lässt sich nur experimentell bestimmen [Petersen, 1996]. In der Differentialgleichung kommt zu den Massen- und Federkräften die Dämpfungskraft  $R \cdot \dot{w}$  hinzu:

$$M^* \cdot \ddot{w} + R \cdot \dot{w} + K^* \cdot w = 0 \quad \text{Gleichung 2-11}$$

Der Ansatz

$$w(t) = e^{\lambda \cdot t} \quad \text{Gleichung 2-12}$$

mit 
$$\lambda_{1/2} = -\frac{R}{2 \cdot M^*} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2 \cdot M^*}\right)^2 - \frac{K^*}{M^*}} \quad \text{Gleichung 2-13}$$

führt im Fall  $\left(\frac{R}{2 \cdot M^*}\right)^2 > \frac{K^*}{M^*}$  (überkritische Dämpfung) zu folgender Lösung:

$$w(t) = A_1 \cdot e^{\lambda_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{\lambda_2 \cdot t} \quad \text{Gleichung 2-14}$$

Diese Gleichung (Gleichung 2-14) beschreibt einen Rückkriechprozess zum statischen Gleichgewichtszustand.

Im Sonderfall  $\left(\frac{R}{2 \cdot M^*}\right)^2 = \frac{K^*}{M^*}$  spricht man von „kritischer“ Dämpfung  $R_{krit}$  mit

$$R_{krit}^2 = 4 \cdot K^* \cdot M^*; \quad R_{krit} = 2 \cdot \sqrt{K^* \cdot M^*} = 2 \cdot \frac{K^*}{\omega} = 2 \cdot M^* \cdot \omega \quad \text{Gleichung 2-15}$$

Im dritten Fall,  $\left(\frac{R}{2 \cdot M^*}\right)^2 < \frac{K^*}{M^*}$ , spricht man von unterkritischer Dämpfung. Er kommt in der Bauwerksdynamik fast ausschließlich vor.

$$\text{Mit } \lambda_{1/2} = -\frac{R}{2 \cdot M^*} \pm i \cdot \sqrt{\frac{K^*}{M^*} - \left(\frac{R}{2 \cdot M^*}\right)^2} \quad \text{Gleichung 2-16}$$

kann die Lösung für die Gleichung (Gleichung 2-11) in folgender Form angegeben werden:

$$w(t) = e^{-\frac{R}{2M^*}t} \cdot (A_1 \cdot e^{i\omega_d t} + A_2 \cdot e^{-i\omega_d t}) = e^{-D\omega t} \cdot (A_1 \cdot e^{i\omega_d t} + A_2 \cdot e^{-i\omega_d t}) \quad \text{Gleichung 2-17}$$

Mit den Eulerschen Formeln

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \cdot \sin \varphi \quad \text{und} \quad e^{-i\varphi} = \cos \varphi - i \cdot \sin \varphi \quad \text{Gleichung 2-18}$$

kann die Lösung für die Gleichung (Gleichung 2-11) wie folgt dargestellt werden:

$$w(t) = e^{-\frac{R}{2M^*}t} \cdot (A_3 \cdot \sin \omega_d t + A_4 \cdot \cos \omega_d t) = e^{-D\omega t} \cdot (A_3 \cdot \sin \omega_d t + A_4 \cdot \cos \omega_d t) \quad \text{Gleichung 2-19}$$

Die Größen  $A_1$  bis  $A_4$  können berechnet werden, wenn die Anfangsbedingungen Auslenkung  $w(0)$  und Geschwindigkeit  $\dot{w}(0)$  zur Zeit  $t=0$  bekannt sind.

Auslenkung zur Zeit  $t=0$

$$A_3 = w(0) \quad [\text{m}]$$

Geschwindigkeit zur Zeit  $t=0$

$$\dot{w}(0) = -D \cdot \omega \cdot A_3 + \sqrt{1 - D^2} \cdot \omega \cdot A_4 \quad [\text{m/s}] \quad \text{Gleichung 2-20}$$

$$A_4 = \frac{D \cdot \omega \cdot w(0) + \dot{w}(0)}{\sqrt{1 - D^2} \cdot \omega} \quad [\text{m}] \quad \text{Gleichung 2-21}$$

$D$  (in der Literatur z. T. auch mit  $\zeta$  bezeichnet) ist das Lehr'sche Dämpfungsmaß und beschreibt das Verhältnis von vorhandener zu kritischer Dämpfung. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$D = \frac{R}{R_{krit}} = \frac{R}{2 \cdot M^* \cdot \omega} \quad \text{Gleichung 2-22}$$

$\omega_d$  ist die gedämpfte Eigenkreisfrequenz. Sie ist – wenigstens theoretisch – zu unterscheiden von der ungedämpften Eigenkreisfrequenz  $\omega$ :

$$\omega_d = \sqrt{\frac{K^*}{M^*} - \left(\frac{R}{2 \cdot M^*}\right)^2} = \omega \cdot \sqrt{1 - D^2} \quad \text{Gleichung 2-23}$$

In der Baupraxis liegen die Dämpfungskonstanten  $D$  üblicherweise zwischen 0,5 % bis ca. 3,0 %, in Ausnahmefällen bis 10 %. Die Dämpfung ist abhängig von der Lagerung sowie dem Material und der Struktur der schwingenden Masse.

Der Unterschied in den Frequenzen macht sich in der Berechnung kaum bemerkbar. So gilt z. B. für  $D = 3,0 \%$  :  $\omega_d / \omega = 0,99955$ , für  $D = 10,0 \%$  :  $\omega_d / \omega = 0,9950$ .

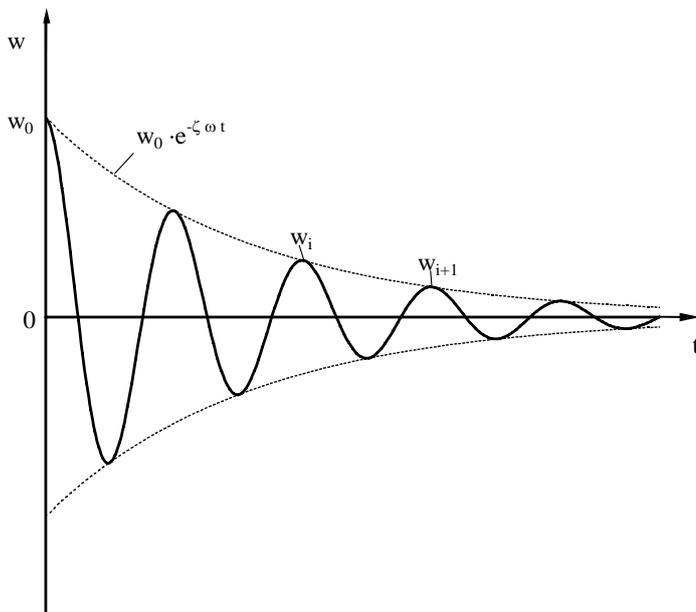


Abbildung 2-3  
Freie, gedämpfte Schwingung mit unterkritischer Dämpfung

### 2.1.3 Der lineare Einmassenschwinger mit harmonischer Anregung

Im Fall der personen- induzierten Schwingung von Holzdecken liegt keine freie, sondern eine erzwungene Schwingung vor (vgl. Gleichung 2-2). Die Antwort der Decke setzt sich aus dem Einschwingvorgang und dem eingeschwungenen Zustand zusammen. Beim Einschwingvorgang sind die beiden Anteile, homogener Anteil und partikulärer Anteil (=Lastanteil) gleichzeitig vorhanden (vgl. Gleichung 2-24). Das System „will“ in seiner Eigenfrequenz schwingen, die äußere Last zwingt aber eine Bewegung in der Erregerfrequenz auf; deshalb sind beim Einschwingvorgang beide Frequenzen vorhanden. Je nach Größe der Dämpfung dauert es einige Schwingungen, bis der Einschwingvorgang abgeschlossen ist und das System nur noch im Lastanteil schwingt. Man spricht dann vom eingeschwungenen oder stationären Zustand. Dieser ist in den meisten Fällen maßgebend für die Berechnung der Bauwerksantwort. Ausnahmen gibt es bei kurzen Einwirkungen, bei denen der Einschwingvorgang überwiegt.

$$w(t) = \underbrace{e^{-D\omega t} (A_1 \cdot \cos \omega_d t + A_2 \cdot \sin \omega_d t)}_{\text{HOMOGENER ANTEIL}} + \underbrace{\frac{F_0}{K^*} \cdot \frac{V(\eta)}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2 \cdot \zeta \cdot \eta)^2}} \cdot \cos(\Omega t - \alpha)}_{\text{PARTIKULÄRER ANTEIL}} \quad \text{Gleichung 2-24}$$

Zur Berechnung der stationären Antwort der Decken ist das Verhältnis  $\eta$  der Erreger- zur Eigenfrequenz entscheidend:

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega} \quad \text{Gleichung 2-25}$$

Wird die statische Auslenkung unter der Last  $F_0$  mit  $w_{stat}$  bezeichnet, so gilt:

$$w_{stat} = \frac{F_0}{K^*} \quad \text{Gleichung 2-26}$$

Die maximale dynamische Auslenkung  $w_0$  kann dann berechnet werden zu

$$w_0 = w_{dyn} = w_{stat} \cdot V(\eta) \quad \text{Gleichung 2-27}$$

Die Vergrößerungsfunktion  $V(\eta)$  ist abhängig von der Dämpfungskonstanten  $D$  und dem Frequenzverhältnis  $\eta$ .

$$V(\eta) = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + (2 \cdot D \cdot \eta)^2}} \quad \text{Gleichung 2-28}$$

Die Phasenverschiebung  $\alpha$  drückt aus, um wie viel die Antwort der Einwirkung „hinterher eilt“. Sie wird wie folgt berechnet: Für  $\eta = 1$  gilt  $\alpha = \pi / 2$ .

$$\tan \alpha = \frac{2 \cdot D \cdot \eta}{1 - \eta^2} \quad \text{Gleichung 2-29}$$

Abbildung 2-4 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Frequenzverhältnis  $\eta$  und der Vergrößerungsfunktion  $V(\eta)$ . Mit den im Bauwesen vorkommenden, kleinen Dämpfungswerten ( $D \ll 1$ ) und  $\eta \rightarrow 1$  wächst die Vergrößerungsfunktion stark an. Für diese Grenzwerte verliert die homogene und gewinnt die partikuläre Lösung mit der stationären Amplitude  $w_0$  an Bedeutung (Ausnahme siehe oben).

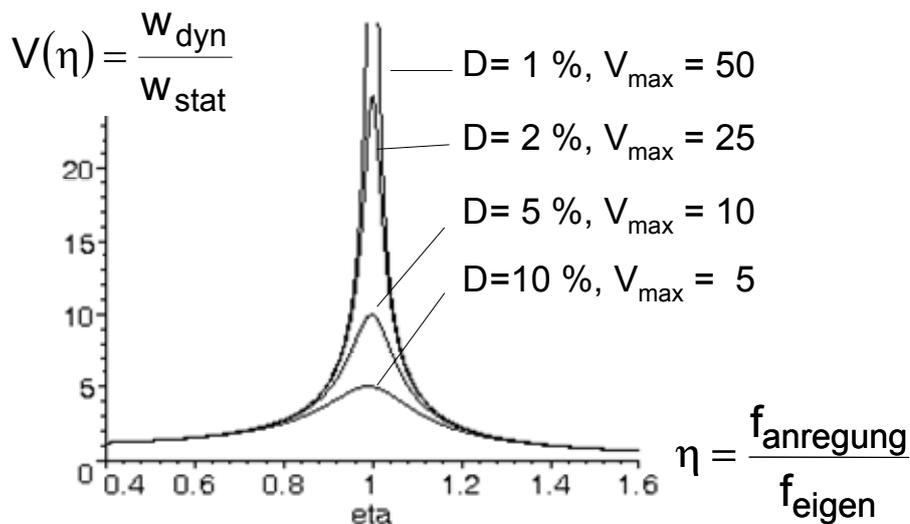


Abbildung 2-4  
Vergrößerungsfunktion für unterschiedliche Dämpfungswerte

Streng genommen liegt das Maximum für  $V(\eta)$  bei  $\eta = \sqrt{1 - 2 \cdot D^2}$ . Wegen der kleinen Dämpfungswerte spricht man aber für  $\eta = 1$  vom Resonanzfall. Dann gilt

$$V_{\max} \cong V(\eta = 1) = \frac{1}{2 \cdot D} \quad \text{Gleichung 2-30}$$

Das heißt, dass die maximale Auslenkung im Resonanzfall folgenden Wert annimmt:

$$w_{0,\max} \cong w_0(\eta = 1) = w_{\text{stat}} \cdot \frac{1}{2 \cdot D} = \frac{F_0}{K^*} \cdot \frac{1}{2 \cdot D} \quad \text{Gleichung 2-31}$$

Die maximale Deckenbeschleunigung ist eine wichtige Größe bei der Beurteilung der Schwingungen. Sie berechnet sich als zweite Ableitung der Auslenkung mit Gleichung 2-32:

$$\ddot{w}_0(\eta = 1) = \omega^2 \cdot \frac{F_0}{K^*} \cdot \frac{1}{2 \cdot D} = \frac{F_0}{M^*} \cdot \frac{1}{2 \cdot D} \quad \text{Gleichung 2-32}$$

Wird der Einschwingvorgang nach Gleichung (Gleichung 2-24) betrachtet, so folgt aus den Randbedingungen

$$w(0) = 0 \text{ und } \dot{w}(0) = 0: \quad A_1 = 0 \text{ und } A_2 = -\frac{F_0}{K^*} \cdot \frac{1}{2 \cdot D} \quad \text{Gleichung 2-33}$$

Im Resonanzfall erhält man durch zweimaliges Ableiten nach der Zeit die Beschleunigung zu

$$\ddot{w}_0(\eta = 1) = \frac{F_0}{M^*} \cdot \frac{1}{2 \cdot D} \cdot \sin \omega t \cdot (1 - e^{-D \cdot \omega t}) \quad \text{Gleichung 2-34}$$

Der Faktor  $(1 - e^{-D \cdot \omega t})$  beschreibt den Einschwingvorgang, siehe oben. Für die Grenzbetrachtung  $t \rightarrow \infty$ , geht der Faktor gegen 1 und es bleibt der Anteil für den stationären Zustand, vgl. Gleichung 2-32.

Bei höherer Dämpfung ist der Einschwingvorgang früher abgeschlossen, weil die „Eigenschwingung“ schneller gedämpft wird.

## 2.2 Übertragung auf Balken

Im Unterschied zum Einmassenschwinger, welcher genau eine Eigenfrequenz hat, hat ein Balken theoretisch unendlich viele Eigenformen und zugehörige Eigenfrequenzen. Als Eigenfrequenzen eines Balkens werden die Frequenzen bezeichnet, in welchen er „am liebsten“ schwingt. Für die Betrachtung der personen- induzierten Deckenschwingungen ist i. A. nur die niedrigste (= erste) Eigenfrequenz relevant. Sie wird im Falle eines gelenkig gelagerten Einfeldträgers (Abbildung 2-5) nach Gleichung 2-35 berechnet.

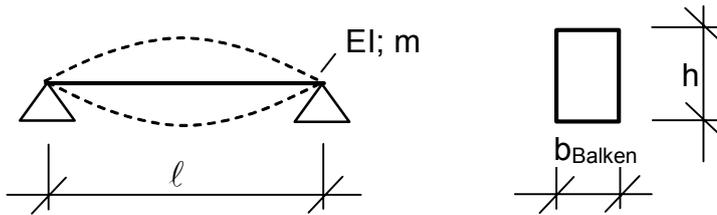


Abbildung 2-5  
Einfeldträger: Schwingungen in der ersten Eigenfrequenz und Querschnitt

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 \cdot \ell^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} = f_{\text{Balken}} \quad \text{Gleichung 2-35}$$

$$\text{mit } I = \frac{b_{\text{Balken}} \cdot h^3}{12} \quad \text{Gleichung 2-36}$$

## 2.3 Übertragung auf Platten

Für flächige, rechteckige Bauteile mit zweiachsiger Spannrichtung (vierseitige Lagerung) aus z. B. BSP- Platten gilt folgende Gleichung für die Eigenfrequenz:

$$f_{\text{Platte}} = f_{\text{Balken}} \cdot \sqrt{1 + 1/\alpha^4} \quad \text{Gleichung 2-37}$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{b}{\ell} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_{\text{Längs}}}{EI_{\text{Quer}}}} \quad \text{Gleichung 2-38}$$

$b$  ist die Spannweite in Querrichtung oder Deckenbreite

$EI_{\text{Längs}}$  ist die effektive Biegesteifigkeit in Längsrichtung je Meter Breite

$EI_{\text{Quer}}$  ist die effektive Biegesteifigkeit in Querrichtung je Meter mit  $(EI)_{\text{Längs}} > (EI)_{\text{Quer}}$

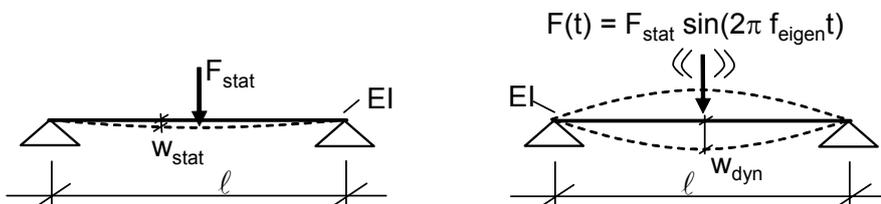


Abbildung 2-6  
Vergleich statische und dynamische Last

Wird der Balken oder die Platte wiederholt angeregt und entspricht die Anregungsfrequenz genau einer der Eigenfrequenzen, spricht man von Resonanz. Bei Belastung eines Balkens nach Abbildung 2-6, einmal durch eine statische Kraft  $F_{stat}$  und einmal durch eine dynamische Kraft  $F(t)$ , erhält man die beiden Amplituden  $w_{stat}$  und  $w_{dyn}$  nach Erreichen des eingeschwungenen Zustandes im Resonanzfall (vgl. Gleichung 2-30):

$$w_{stat} = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot EI_\ell \cdot b_{eff}} \quad \text{Gleichung 2-39}$$

$$\text{mit } b_{eff} = \frac{\ell}{1,1} \cdot \sqrt{\frac{EI_b}{EI_\ell}} \quad \text{Gleichung 2-40}$$

$$w_{dyn} = \frac{1}{2D} \cdot w_{stat} = V_{max} \cdot w_{stat} \quad \text{Gleichung 2-41}$$

## 2.4 Einwirkungen auf Decken - Personeninduzierte Anregung

In Abhängigkeit von der Eigenfrequenz der Decke wird deren Schwingungsverhalten unterschiedlich wahrgenommen. Bei kleineren Frequenzen (bis ca. 8 Hz) ist das (Un-) Wohl-Empfinden von der Schwingbeschleunigung, bei größeren Frequenzen (ab ca. 8 Hz) von der Schwinggeschwindigkeit abhängig. Abbildung 2-7, die sog. „Basiskurve“ aus [ISO 2631-2] verdeutlicht den Zusammenhang. Die obere „grüne Grenze“ gilt als die Wahrnehmbarkeitsgrenze.

Dementsprechend werden die personeninduzierten Anregungen zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens in drei Kategorien unterteilt, vgl. [Kreuzinger/Mohr, 1999]:

- 1) kurzer Impuls durch Heeldrop
- 2) einmalige Auslenkung durch Fußauftritt
- 3) oft wiederholte Anregung durch Schritte

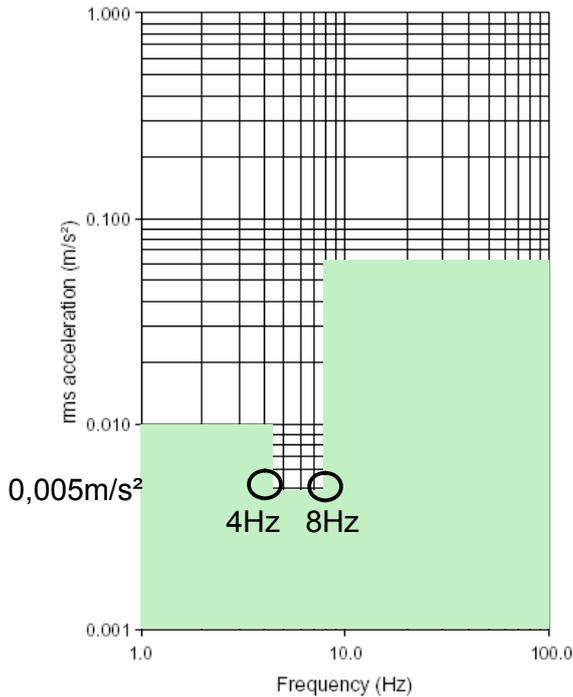


Abbildung 2-7  
„Basiskurve“ aus [ISO 2631-2]

### 2.4.1 Kurzer Impuls durch Heeldrop → Schwinggeschwindigkeit

Gemeint ist eine einmalige Anregung durch einen Impuls mit kurzer Einwirkungsdauer, wie z. B. beim Heeldrop (= Fersenauftritt).

Mathematisch gesehen ist der Impuls eine sehr kurze Krafteinwirkung auf ein System. Ein Maß für den Impuls  $I$  [Ns] ist das Integral der Kraft über die Zeit oder Masse mal Geschwindigkeit. Wird ein Balken nach Abbildung 2-6 durch einen Impuls angeregt, schwingt er in seinen Eigenfrequenzen mit der Anfangsgeschwindigkeit  $v_{\text{Balken}}$ .

$$I = \int F(t) dt = M_{\text{Person}} \cdot v_{\text{Person}} = M_{\text{Balken}}^* \cdot v_{\text{Balken}} \quad \text{Gleichung 2-42}$$

$$\text{und } v_{\text{Balken}} = \frac{I}{M_{\text{Balken}}^*} = \frac{M_{\text{Person}} \cdot v_{\text{Person}}}{m \cdot \ell / 2} \quad \text{Gleichung 2-43}$$

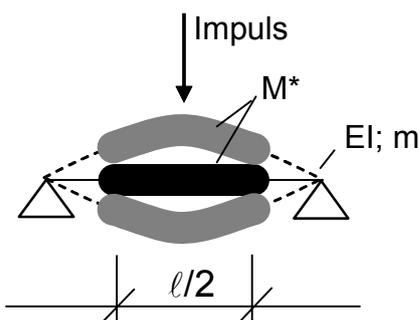


Abbildung 2-8  
Verdeutlichung der mitschwingenden (=generalisierten) Masse nach einem Impuls

Beim Heeldrop stellt sich die Versuchsperson auf die Zehenspitzen und lässt sich auf die Fersen fallen. Vorteil des Heeldrops ist, dass er innerhalb einer Messreihe relativ gut reproduzierbar ist. Allerdings kann die Größe des erzeugten Impulses schwanken je nach Untergrund, Schuhwerk, Masse der Versuchsperson etc. Abbildung 2-9 zeigt den (angenommenen) Kraftverlauf beim Heeldrop. Bei einer Fallhöhe von  $0,05\text{ m}$  und einer bewegten Masse von  $55\text{ kg}$  wird von einem mittleren Heeldrop in der Größenordnung von  $55\text{ N}\cdot\text{s}$  ausgegangen (Gleichung 2-44):

$$I = \int F(t) \cdot dt = M_{\text{Person}} \cdot v_{\text{Person}} = M \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = 55 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,05} = 55 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 55 \text{ N} \cdot \text{s} \quad \text{Gleichung 2-44}$$

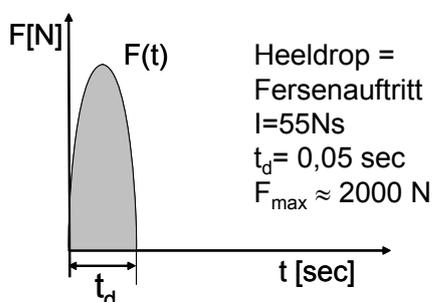


Abbildung 2-9  
Kraft-Zeit-Verlauf beim Heeldrop

Aufgrund des Impulserhaltungssatzes (Gleichung 2-42) ist die Masse der Decken entscheidend für deren Schwinggeschwindigkeit und die subjektive Bewertung des Schwingungsverhaltens. Nach den Erfahrungen der Autorinnen bewirkt der Heeldrop keine störenden Schwinggeschwindigkeiten bei Decken mit Aufbauten, die alle üblichen Schallschutzanforderungen erfüllen. Sind die Decken einschließlich Deckenaufbauten jedoch zu leicht (oder noch im Rohbau), werden unangenehme Schwingungen beobachtet.

Die Geschwindigkeit eines Balkens (Gleichung 2-45) bzw. einer zweiachsig gespannten Deckenplatte (Gleichung 2-46) nach einem Heeldrop kann wie folgt berechnet werden:

$$v = \frac{55}{m \cdot e \cdot \ell / 2 + 50} \frac{m}{s} \quad \text{Gleichung 2-45}$$

$e$  ist der Balkenabstand bzw. die Einflussbreite des Balkens in [m]

$m$  die flächenbezogene Masse in [kg/m<sup>2</sup>]

50 kg steht für die mitschwingende Masse der Versuchsperson

$$v = \frac{0,6}{m^{0,5} \cdot EI_{\ell}^{0,25} \cdot EI_b^{0,25}} \frac{m}{s} \quad \text{Gleichung 2-46}$$

#### 2.4.2 Einmalige Auslenkung durch Fußauftritt → Steifigkeitskriterium

Damit ist eine einmalige Anregung durch einen länger andauernden Impuls mit anschließendem Abklingen der Schwingung gemeint, hervorgerufen durch z. B. einen einmaligen Fußauftritt.

Zur Begrenzung der Schwingungsantwort wird das Steifigkeitskriterium eingeführt. Nach [Mohr, 2001] ist die Steifigkeit der Decke maßgebend für deren Schwingungsanfälligkeit.

Die Einhaltung einer bestimmten Steifigkeit bewirkt, dass die Auslenkung durch eine einmalige Einwirkung klein genug bleibt, z. B. die Durchbiegung infolge eines Fußauftrittes unterhalb eines Wertes bleibt. Die Steifigkeit wird ausgedrückt als Durchbiegung unter einer Einzellast in Feldmitte.

#### 2.4.3 Oft wiederholte Anregung durch Schritte → Schwingbeschleunigung, beeinflusst durch Masse und Dämpfung

Personen geben beim Gehen, Laufen, Hüpfen, Tanzen etc. periodische Kräfte auf den Untergrund ab. Die Kraft lässt sich gut als Fourierreihe, d.h. als Summe mehrerer harmonischer Anteile mit  $i$ -facher Schrittfrequenz darstellen.

$$F(t) = F_0 \cdot \left( 1 + \sum \alpha_i \cdot \sin(2\pi \cdot i \cdot f_s \cdot t - \varphi_i) \right) \quad \text{Gleichung 2-47}$$

$F_0$  ist das Eigengewicht der Person. Es wird üblicherweise mit 700 N angesetzt. Werte für die Schrittfrequenzen  $f_s$ , Fourierkoeffizienten  $\alpha_i$  und die Phasenverschiebung  $\varphi_i$  sind in Tabelle 2-1 angegeben.

Tabelle 2-1 Schrittfolgen, Fourierkoeffizienten und Phasenverschiebung, siehe [Bachmann; 1997]

	Frequenz Hz	Fourierkoeffizienten			Phasenverschiebung		
		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
Gehen vertikal horizontal	1,5 bis 2,4	0,4 0,1	0,2 0,1	0,1	0	$\pi/2$	$\pi/2$
Laufen	2,5 bis 3,5	1,3	0,4	0,1	0	$\pi/2$	$\pi/2$
Hüpfen	2,0 bis 3,0	1,8	1,3	0,8			
Tanzen	2,0 bis 3,0	0,5	0,15	0,15			

Bei oft wiederholten Anregungen mit einer Anregungsfrequenz (= Schrittfrequenz), die der Hälfte oder einem Drittel der Eigenfrequenz entspricht, kann Resonanz entstehen. Die Decke kann sich aufschaukeln.

Abbildung 2-10 zeigt den Kraft- Zeit- Verlauf der beim Gehen abgegebenen Kraft auf den Untergrund.

Die mittlere Schrittfrequenz liegt bei etwa 2 Hz mit einer Streuung von 1,5 bis 2,4 Hz (vgl. Tabelle 2-1 und Abbildung 2-11).

Da beim Gehen nicht nur Kräfte in der Schrittfrequenz sondern auch in den höheren (2. und 3.) harmonischen Anteilen abgegeben werden, kann Resonanz bei Decken mit Eigenfrequenzen bis  $3 \cdot 2,4 \text{ Hz} = 7,2 \text{ Hz}$  möglich sein, vgl. Abbildung 2-11.

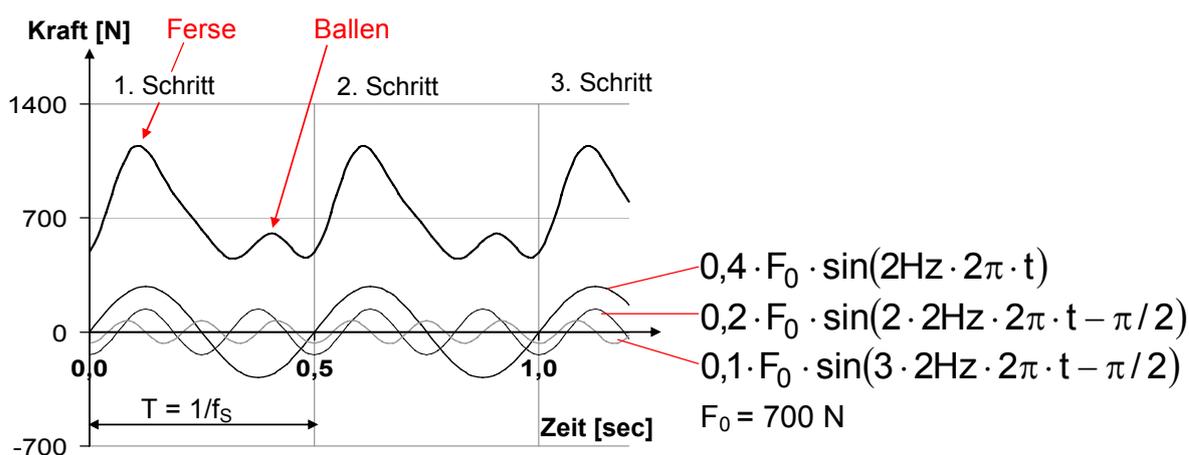


Abbildung 2-10 Kraft- Zeit- Verlauf beim Gehen mit Schrittfrequenz  $f_s = 2 \text{ Hz}$

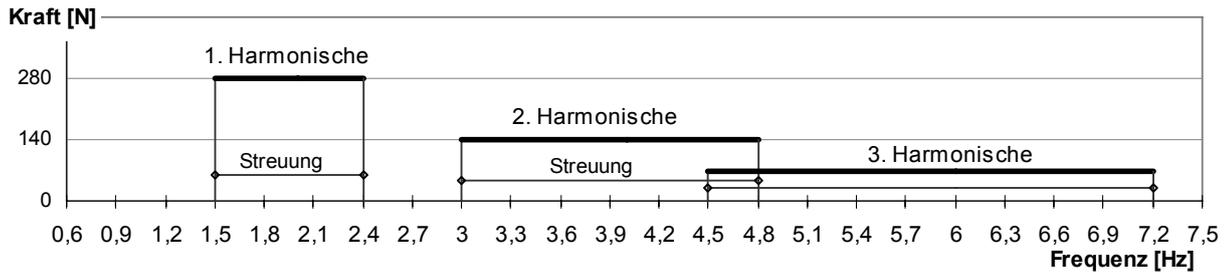


Abbildung 2-11  
Zusammenhang zwischen der Frequenz und der abgegebenen Kraft beim Gehen

Um Resonanz mit gehenden Personen zu vermeiden, sollte die Eigenfrequenz der Decke mindestens 7,2 Hz betragen. Falls dies nicht gelingt und die Eigenfrequenz im Bereich der Streuung der zweiten oder dritten Harmonischen liegt, kann die Beschleunigung der Decke infolge einer gehenden Person bei Resonanz wie folgt berechnet werden:

Für die Beschleunigung des Einfeldträgers nach Abbildung 2-6 infolge einer gehenden Person gilt:

$$a \left[ \frac{m}{s^2} \right] = \frac{F_{dyn}}{M \cdot 2D} = \frac{0,4 \cdot F(t) [N]}{m [kg/m] \cdot 0,5 \ell [m] \cdot 2D} \quad \text{Gleichung 2-48}$$

Für ein einachsig oder zweiachsig gespanntes Deckenfeld als Einfeldträger mit der (Raum-) Breite  $b$ :

$$a \left[ \frac{m}{s^2} \right] = \frac{F_{dyn}}{M \cdot 2D} = \frac{0,4 \cdot F(t) [N]}{m [kg/m^2] \cdot 0,5b [m] \cdot 0,5 \ell [m] \cdot 2D} \quad \text{Gleichung 2-49}$$

$$F_{dyn} = 0,4 \cdot F(t) \quad \text{Gleichung 2-50}$$

Die einwirkende zeit- und ortveränderliche Kraft wird mit 40% der Kraft  $F(t)$  nach Gleichung 2-50 und Abbildung 2-11 angesetzt. Der Faktor 0,4 berücksichtigt die wechselnde Einwirkungsstelle und die Tatsache, dass die Einwirkungsdauer begrenzt ist (Abbildung 2-12) und der eingeschwingene Zustand meist nicht ganz erreicht wird, vgl. [Kreuzinger / Mohr, 1999].

Das bedeutet, wenn nicht nur eine gehende Person, sondern eine Gruppe von  $n$  im Gleichschritt gehenden Personen angesetzt wird, lautet Gleichung 2-50:  $F_{dyn} = n \cdot F(t)$

In Gleichung 2-48 und Gleichung 2-49 ist  $m$  die charakteristische Masse der Decke nach DIN 1055-100;

$b/2$  ist die mitschwingende Breite des Deckenfeldes. Bei für BSP-Platten üblichen Querbiegesteifigkeiten und Raumabmessungen mit  $b \leq 1,5 \cdot \ell$  kann für  $b$  die Raumbreite eingesetzt werden.

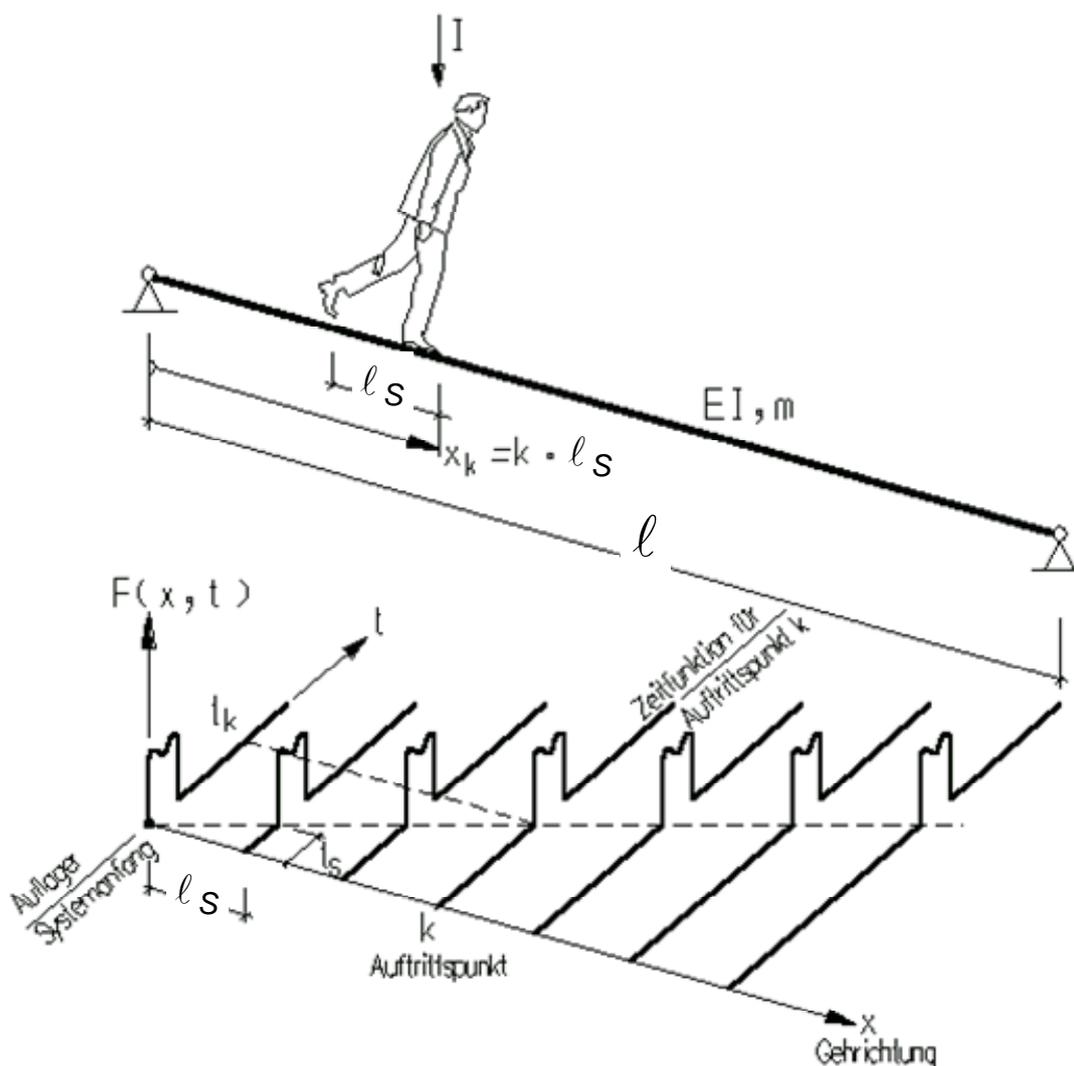


Abbildung 2-12  
Verdeutlichung der Zeit- und Ortsabhängigkeit der Kraft auf den Untergrund beim Gehen,  
aus [Kreuzinger, 1995]



## 3 Stand der Forschung und Normung

### 3.1 Historische Entwicklung

In der amerikanischen Literatur werden die personen-induzierten Schwingungen von Decken bereits 1828 erwähnt, vgl. [Tretgold, 1828]. Sinngemäß übersetzt heißt es: „Träger mit großen Spannweiten sollten hoch (Querschnittshöhe) ausgeführt werden, um die Unannehmlichkeit zu vermeiden, dass man nicht umhergehen kann, ohne alles im Raum zu erschüttern.“ Diese Forderung mündete in einer Durchbiegungsbegrenzung von  $l/360$  für Stahlträger unter Verkehrslast.

Trotz dieser Regelung wurden vor ca. 30 Jahren Probleme und Beschwerden durch personen-induzierte Schwingungen bei Decken auf Stahl-Fachwerkträgern bekannt. Seit ungefähr dieser Zeit wird an dem Phänomen der personen-induzierten Schwingungen an Decken und Brücken geforscht, vgl. [Murray, 2003].

Ähnliches kann im Holzbau beobachtet werden:

Bis zur [DIN 1052] in der Fassung von 1988 wurde die Gebrauchstauglichkeit durch eine Durchbiegungsbegrenzung nachgewiesen. Bei Decken sind das die bekannten  $l/300$  unter Volllast, bei Fußgängerbrücken  $l/400$  unter Verkehrslast.

Bei den früher üblichen Raumabmessungen von ca. 4 x 5 m<sup>2</sup> war eine Durchbiegung unter Volllast bei  $l/300$  von max. 13 mm erlaubt. Die modernen Bauherren wünschen sich immer größere, stützenfreie Räume. Mit den neu entwickelten Holzwerkstoffen, wie z.B. Brettsperrholz und Rippenträgern sind die Querschnittsabmessungen fast beliebig und große Spannweiten können realisiert werden. Die „absolute“ Durchbiegung unter Volllast bei Einhaltung von  $l/300$  wird dadurch aber immer größer. Bei einer Spannweite von 6,5 m wären schon 22 mm zugelassen.

Mit einer Zunahme der „absoluten“ Durchbiegung nimmt die Eigenfrequenz der Decke ab. Einen direkten Zusammenhang zwischen der Durchbiegung unter der permanenten Last und der Eigenfrequenz beim gelenkig gelagerten Einfeldträger zeigt Gleichung 3-1 (analog zu Gleichung 2-10).

$$f_{e,perm} = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot w_{perm} [cm]}} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

Der Index „perm“ steht für permanent. Entsprechend ist  $w_{perm}$  die Durchbiegung unter ständiger Last (=Eigenlast  $g$ ) plus quasi-ständigem Verkehrslastanteil.  $f_{e,perm}$  ist die zugehörige erste Eigenfrequenz unter Berücksichtigung genau dieser Einwirkung. Im Sinne der Norm [DIN 1055-100] wird der quasi-ständige Verkehrslastanteil bei Wohnungen mit 30 % der Verkehrslast  $p$  angenommen (Gleichung 3-2).

$$w_{perm} = w_{G,inst} + \psi_2 \cdot w_{Q,inst} = w(g) + 0,3 \cdot w(p) \quad \text{Gleichung 3-2}$$

Volllast:  $q = g + p$  unter Annahme: Verhältnis  $g : p \approx 1 : 1$

$$w(g) \approx w(p) \approx 0,5 \cdot w(q) \quad (\text{ohne Kriechanteil})$$

$$w_{perm} \approx 0,5 \cdot w(q) + 0,3 \cdot 0,5 \cdot w(q) = 0,65 \cdot w(q) \quad \text{Gleichung 3-3}$$

Näherungsweise gilt also für den 4 m langen Einfeldträger:

$$\ell/300 = w(q) = 13 \text{ mm},$$

$$w_{perm} \approx 0,65 \cdot 13 = 8,5 \text{ mm} \text{ und damit}$$

$$f_{e,perm} = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot 0,85 [cm]}} = 6,1 \text{ Hz}.$$

Der 6,5 m lange Einfeldträger mit

$$\ell/300 = w(q) = 22 \text{ mm} \text{ und } w_{perm} \approx 14,3 \text{ mm} \text{ hat eine Eigenfrequenz von}$$

$$f_{e,perm} = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot 1,43 [cm]}} = 4,7 \text{ Hz}$$

Trotz Einhaltung des gewohnten Gebrauchstauglichkeitskriteriums von  $\ell/300$  verschlechtert sich die dynamische Eigenschaft der Decke bei Erhöhung der Spannweite, da die

Eigenfrequenz der Decke abnimmt, vgl. Abbildung 3-1. Daraus folgt, dass der Schwingungsnachweis für Decken mit großen Spannweiten bemessungsrelevant wird.

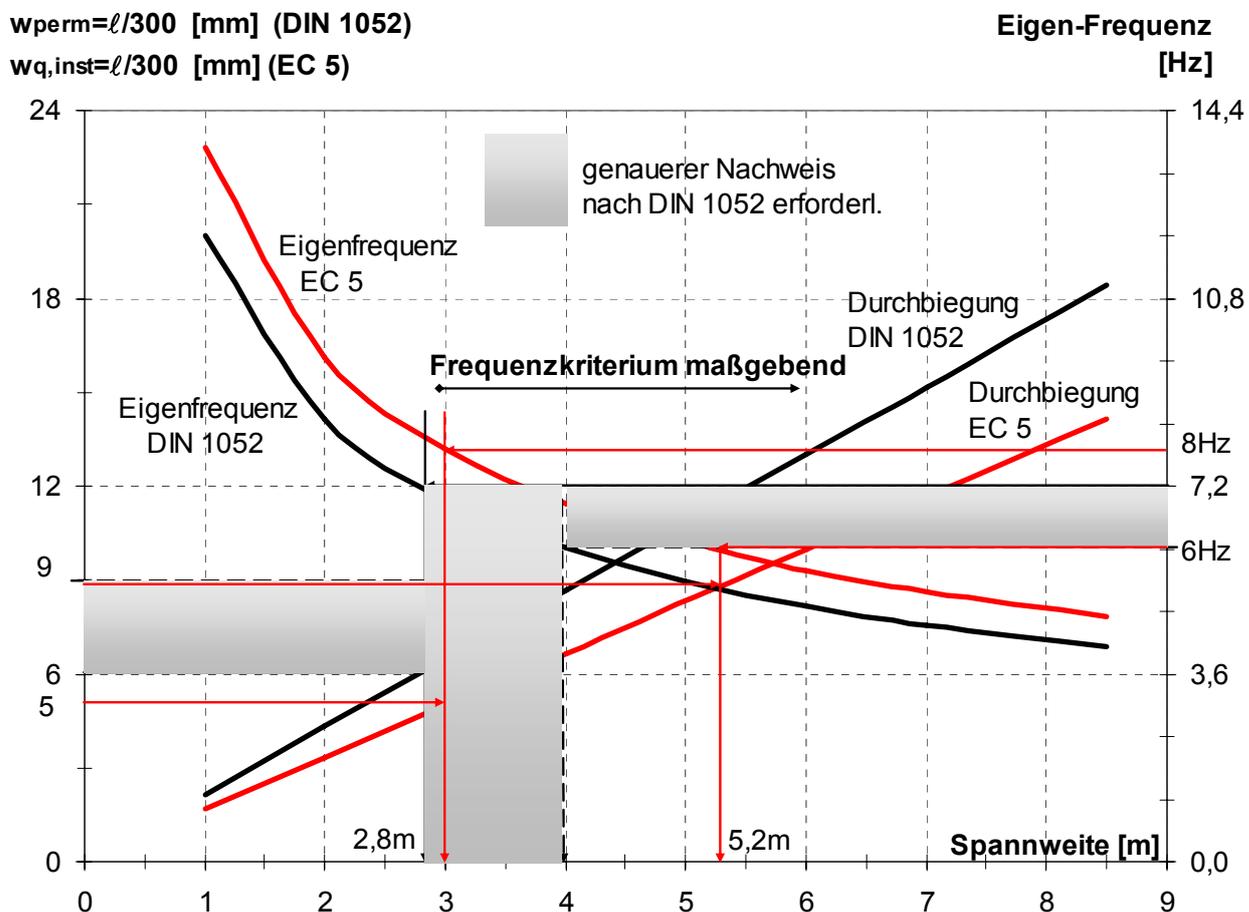


Abbildung 3-1  
 Zusammenhang zwischen Spannweite, Durchbiegung und Eigenfrequenz beim Einfeldträger und Konsequenzen für den Nachweis nach [DIN 1052] (schwarz) und [Eurocode 5] (rot)

## 3.2 Stand der Forschung

### 3.2.1 Vorstellung von anderen Forschungsvorhaben

Im Folgenden wird der Stand der Forschung anhand ausgewählter Beispiele dargelegt:

**Projekt an der TU Graz „Bemessung von Brettsperrholzplatten“ unter der Leitung von Univ.-Prof. Gerhard Schickhofer, [Schickhofer et al., 2009]**

Im Rahmen einer Masterarbeit an der TU Graz [Fitz, 2008] wurde das Schwingungsverhalten von BSP-Decken experimentell, numerisch und theoretisch untersucht. Um die Ergebnisse der Finite-Elemente-Methode verifizieren zu können, wurden Schwingungsmessungen im Labor der MFPA Leipzig GmbH unter definierten Randbedingungen durchgeführt. Die Materialeigenschaften wurden ebenfalls bestimmt und mit den so ermittelten Eingangsgrößen wurden die Messergebnisse mit den Berechnungswerten verglichen.

**Projekt in Quebec, Kanada, FP Innovations – Forintek Division. Bearbeiterin Lin Hu, Ph.D., [Hu, 2001] und [Hu, 2004]**

Die Phase 1 der CLT (cross laminated timber) Deckenschwingungen an Rohkonstruktionen ist gerade abgeschlossen. Rohkonstruktion heißt (wie bei unserem Vorhaben) die reine Tragkonstruktion ohne weiteren Aufbau. In Kanada wird der Nachweis der Schwingungen auch an Rohkonstruktionen geführt. Untersucht wurden die Einflüsse aus Art der Verbindung der einzelnen Elemente, Spannweite, Lagerungsbedingungen, Schraubenbild der Verbindung der Elemente und der Auflager.

**Projekt in Epinal / Nancy, Frankreich, ENSTIB (Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois). Bearbeiter Dr. Jean-Francois Bocquet**

Auch in Frankreich werden Deckenschwingungen an CLT (cross laminated timber) Elementen, hier speziell Typ KLH untersucht. Insbesondere soll die Querbiegesteifigkeit der Verbindungen bei vorgefertigten Elementen bestimmt und modelliert werden.

**Projekt in Trondheim, Norwegen, SINTEF. Bearbeiter Anders Homb**

Anders Homb hat einige Versuche an einzelnen CLT- Elementen im Versuchsstand und auch Messungen in situ im Bauprojekt „Egenes Park“ an der Rohkonstruktion durchgeführt. Er wird noch weitere Versuche durchführen, wenn die Decken inkl. Aufbau fertig gestellt sein werden. Die ersten Versuche sind einfach aufgebaut, d.h. zwei bis drei Elemente nebeneinander, die Elemente sind vom Typ MMT- Elemente mit und ohne Aufbeton.

**Projekt in Edinburgh, Schottland, Napier University, Centre for Timber Engineering. Bearbeiter Dipl.-Ing. (FH) Jan Weckendorf, [Weckendorf, 2006], [Weckendorf, 2008]**

Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Decken, speziell solche Konstruktionen, die in UK überwiegend eingesetzt werden, also für unsere Begriffe leichte Decken. Von Interesse sind die ersten 4-5 Eigenformen mit zugehörigen Frequenzen und Dämpfungswerten sowie die statische Durchbiegung unter Einzellast. Folgende Parameter werden herangezogen:

- Größe,
- Art der Verbindungen,
- Quersteifigkeit,
- Verbindung von Steg-Platte,
- Auflagerbedingungen und
- Aufbau.

Auch der Einfluss der Deckenmasse auf das Schwingungsverhalten wird dabei berücksichtigt. Jan Weckendorf arbeitet sowohl mit dem Versuchsstand als auch mit Hilfe eines FEM-Modells. Ergebnisse zur Dämpfung:

Die Dämpfung zur ersten Eigenform ist normalerweise höher (meistens im Bereich zwischen 2,0 bis 3,5 %), als die zur zweiten oder dritten Eigenform (0,8 bis 1,5 %). Außerdem hat er einen Einfluss der Masse auf die Dämpfung festgestellt, und zwar in der Weise, dass er einen Dämpfungswert für die erste Eigenform von 2 % für „light-weight structures“ (d.h. flächenbezogene Masse kleiner gleich ca. 20 kg/m<sup>2</sup>) empfiehlt. Bei schwereren Decken empfiehlt er kleinere Dämpfungswerte. Zwar schreibt er, dass die schwereren Decken noch weiter untersucht werden müssen, die ausgesprochene Empfehlung deckt sich aber nicht mit den Ergebnissen aus unseren Messungen (vgl. Kapitel 8).

**Projekt in Berkshire, Großbritannien, The Steel Construction Institute: SCI Publication P354. Design of Floors for Vibration: A New Approach – 2007. [SCI 2007]**

Die ersten Bemessungsrichtlinien für Deckenschwingungen des „Steel Construction Institute“ wurden 1989 veröffentlicht. Sie bezogen sich auf „normale“ Bürogebäude und waren in der Praxis weit verbreitet. Die neuen Richtlinien wurden erarbeitet, um den Tragwerksplanern genauere Berechnungen für empfindliche Deckensysteme zu ermöglichen. Die Schwingungsantwort kann mit den Anforderungen des [BS 6472] und der [ISO 10137], sowie des „Health Technical Memorandum 2045“ verglichen werden. Außerdem sind jetzt Regeln für alle Arten von Stahldecken und Stahl-Verbunddecken enthalten.

Das Forschungsprojekt ECSC (European Coal and Steel Community) wurde von folgenden Partnern bearbeitet:

- RWTH Aachen
- Arcelor Profil Luxembourg Research
- TNO Building and Construction Research
- The Steel Construction Institute (SCI)

**EU Projekt 2006. Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls – Vibration of floor (VoF). Report EUR 21972 EN.**

Ergebnis des Vorhabens ist der “Design Guide for Floor Vibrations“ der Arcelor Mittal Commercial Sections. Mit der Bemessungshilfe wurde ein Werkzeug entwickelt, mit dem Ingenieure auch ohne besondere Kenntnisse über die Dynamik der Bauwerke mit einfachen Mitteln Deckenschwingungen abschätzen können.

Die Grundlagen für die Bemessungshilfe wurde mit finanzieller Unterstützung des RFCS (Research Fund for Coal and Steel of the European Community) entwickelt.

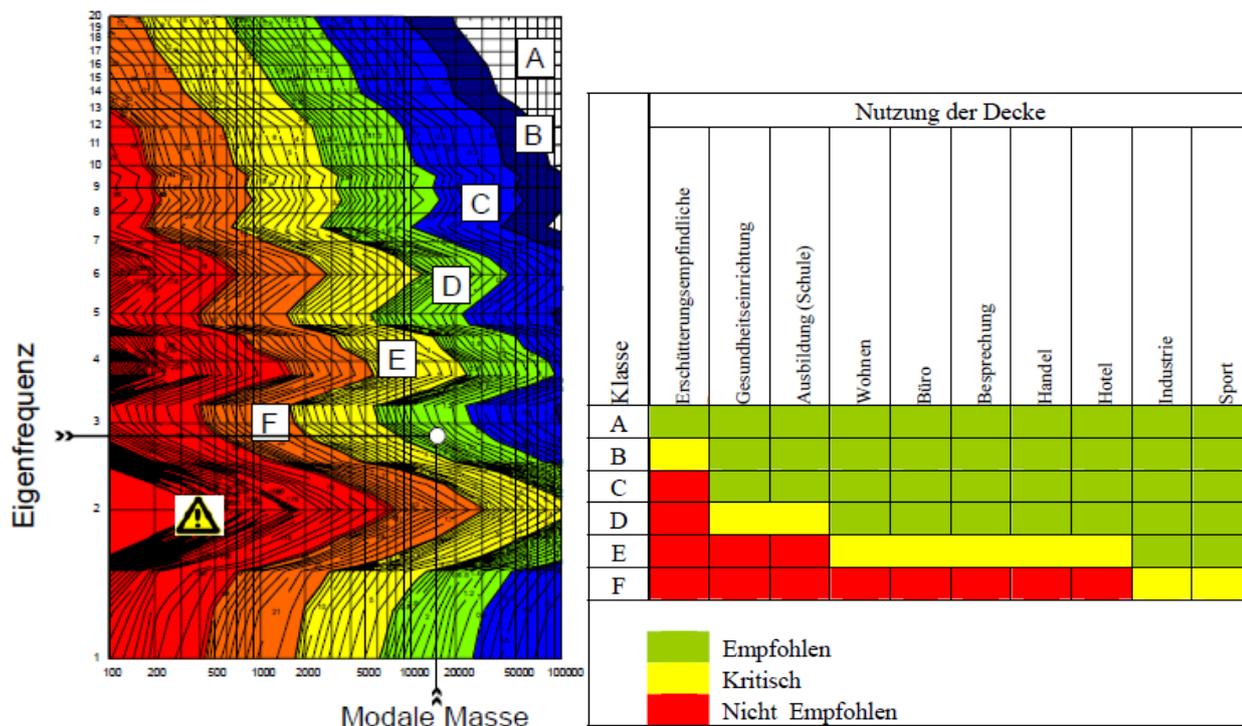


Abbildung 3-2 Bemessungsdiagramm und Komfortklassen aus [Hechler 2007]

Für den Nachweis, dass eine Decke den geforderten Schwingungskomfort besitzt, werden Bemessungsdiagramme verwendet (siehe Abbildung 3-2), aus denen direkt die Wahrnehmungsklasse A bis F abgelesen werden kann.

Eingangsgrößen für die Bestimmung der Wahrnehmungsklasse sind

- Dämpfungseigenschaft unter Berücksichtigung von Ausbau und Möblierung
- Eigenfrequenz
- Zugehörige modale Masse der Decke

Nach der Bestimmung dieser dynamischen Deckeneigenschaften wird entsprechend der Deckendämpfung das Bemessungsdiagramm ausgewählt und wie in Abbildung 3-2 dargestellt die Wahrnehmungsklasse abgelesen.

### 3.2.2 Überblick Forschung

Die ersten vier genannten Projekte in Österreich, Kanada, Frankreich und Norwegen beschäftigen sich ausschließlich mit Brettsper Holzdecken, insbesondere mit dem Verhalten im Bereich der Elementstöße. Dies ist nur ein Teilaspekt unseres Vorhabens.

Das Projekt in Schottland ist vom Aufbau und den Methoden sehr ähnlich zum vorliegend beschriebenen, allerdings wurden keine in-situ-Messungen durchgeführt, die von uns als sehr wichtige Ergänzung geschätzt werden. Des Weiteren behandelt es typische Holzdecken in UK, also für unsere Verhältnisse sehr leichte Decken, die nicht den Schallschutzanforderungen entsprechen.

Die SCI Publikation behandelt Stahl- und Stahl-Verbunddecken und gibt sehr genaue Berechnungsmethoden für diese Bauweisen vor. Ein Teil dieser Vorschriften kann auf die Holzdecken übertragen werden.

Die „Arcelor Mittal Bemessungshilfen“ führen eine Berechnung der Schwingbeschleunigung mit dem entsprechenden harmonischen Anteil der Last für Gehen durch, abhängig von der Eigenfrequenz, der Masse und der Dämpfung der Decke. Jeder Beschleunigungswert wird – in Abhängigkeit von der Nutzung der Decke – einer Komfortklasse zugeordnet. Die Berechnung mit Hilfe der Vergrößerungsfunktion reagiert sehr sensibel auf das Verhältnis von Erreger- und Eigenfrequenz. Da die bereits durchgeführten in-situ-Messungen unseres Vorhabens große Unterschiede in den berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen aufzeigen, wird die genaue Einstufung in eine Eigenfrequenz nicht empfohlen.

### 3.3 Stand der Normung

#### 3.3.1 Allgemeines

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Normung in Deutschland. Die Grenzwerte nach [DIN 1052] und [Eurocode 5] werden gegenübergestellt.

#### 3.3.2 EN 1995-1-1:2004 (D): 2004-11 [Eurocode 5]

Nach Kenntnisstand der Projektbearbeiterinnen wird der Eurocode voraussichtlich ab 2010 verbindlich in Deutschland eingeführt. Die [DIN 1052:2008-12] wurde nach wiederholten Verzögerungen eingeführt. Deshalb erscheint es wichtig und angemessen, die Konstruktions- und Bemessungsregeln verstärkt auch nach dem Eurocode auszurichten.

Um einen besseren Überblick über die Nachweise nach [Eurocode 5] zu bekommen, sind diese hier in in einem Ablaufdiagrammen in Abbildung 3-3 dargestellt.

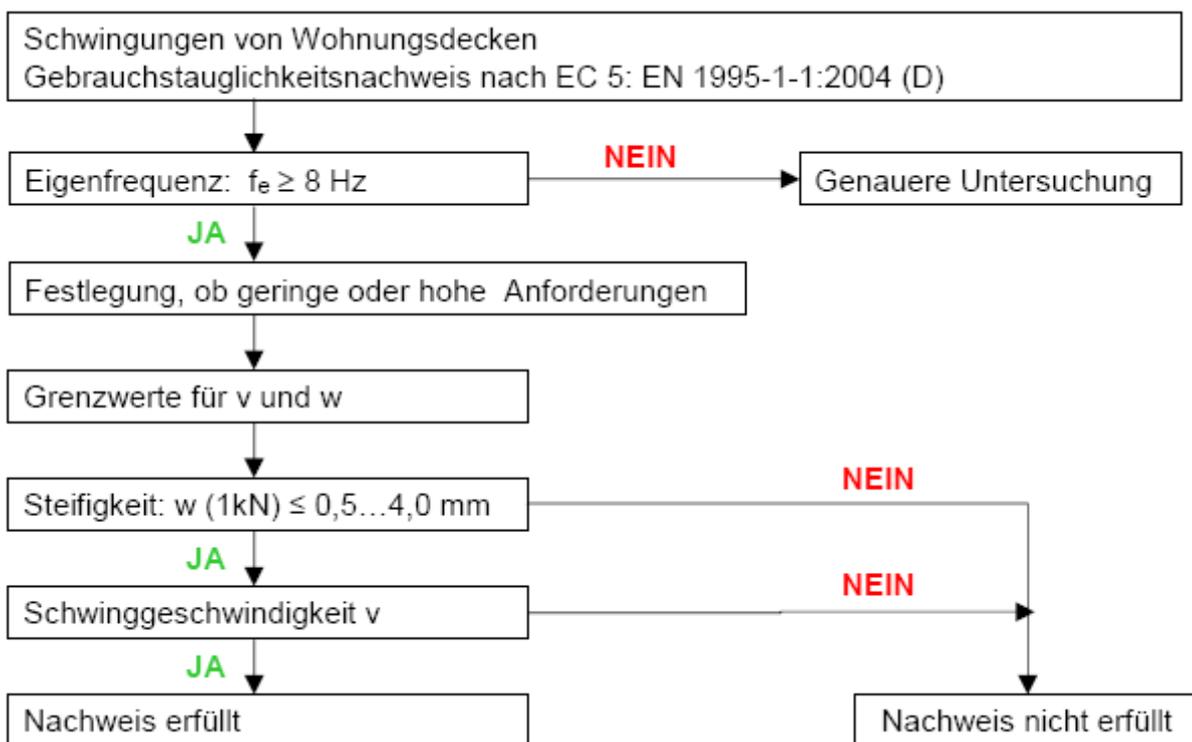


Abbildung 3-3

Ablauf des Schwingungsnachweises im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach [Eurocode 5]

### 3.3.3 DIN 1052:2008-12 (D) [DIN 1052]

Die Nachweise nach [DIN 1052] und den zugehörigen [Erläuterungen] sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

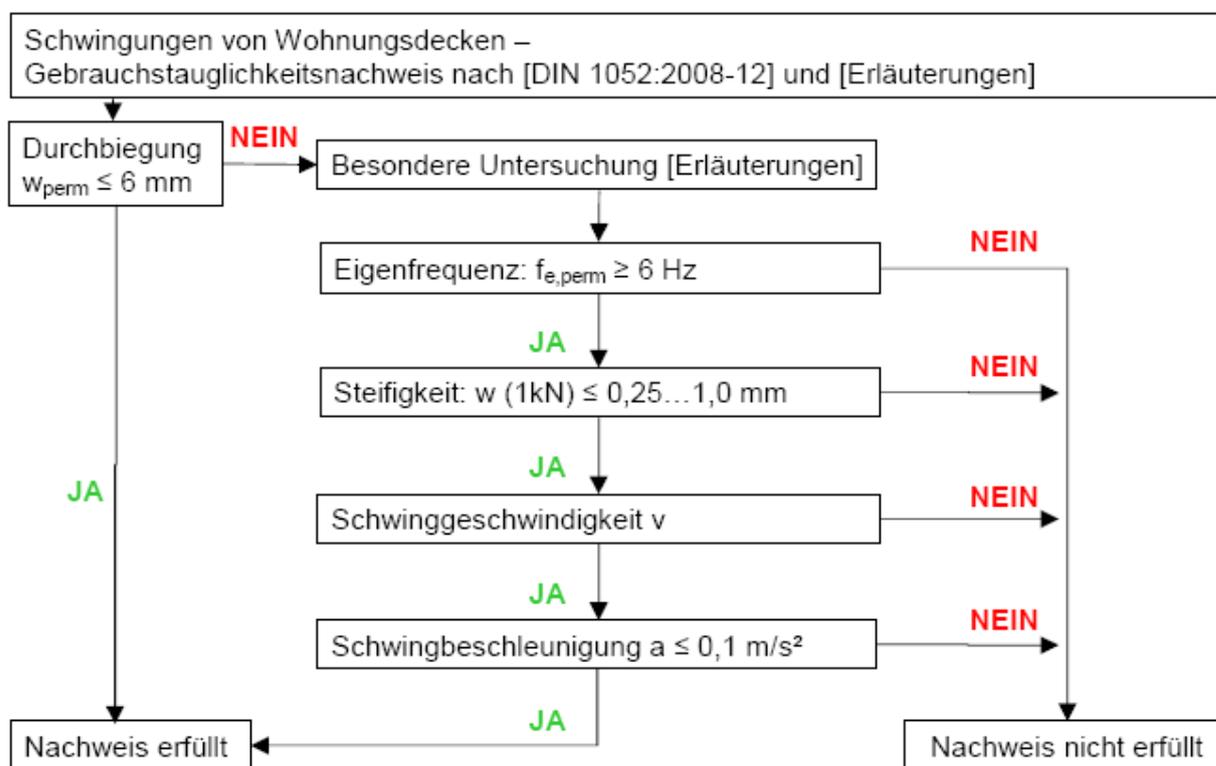


Abbildung 3-4  
Ablauf des Schwingungsnachweises im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach [DIN 1052] und [Erläuterungen]

### 3.3.4 Frequenzkriterium nach [DIN 1052] und [Eurocode 5]

#### 3.3.4.1 Allgemeines / Grundlagen

Die Eigenfrequenz der Decke soll so hoch gewählt werden, dass Resonanz aus Gehen vermieden wird. Die Grenzwerte sind abhängig von der zugrunde gelegten Norm.

Die Eigenfrequenz wird nach den Gleichung 2-1 bzw. Gleichung 2-35 und Gleichung 2-37 berechnet, wobei nach [Eurocode 5] für die Masse  $m$  nur vom charakteristischen „Eigengewicht der Decke und anderen ständigen Einwirkungen“ (vgl. [Eurocode 5] 7.3.3 (3)) ausgegangen wird. Im Gegensatz dazu legt die [DIN 1052] die charakteristische quasi-ständige

Einwirkung nach Gleichung 2-43 zugrunde. In Auswertung des Forschungsvorhabens empfehlen die Autorinnen, die Masse  $m$  wie im [Eurocode 5] empfohlen zu berechnen.

Liegt die Decke auf Unterzügen auf, so ist bei der Berechnung der Eigenfrequenz und der Durchbiegung unter der charakteristischen Einzellast  $F_k$  die Durchbiegung der Unterzüge zusätzlich zu berücksichtigen. D.h. die Summe der Durchbiegungen muss die Grenzwerte einhalten. Ein ausführlicher Beitrag zur Berücksichtigung der Lagerung auf Unterzügen findet sich in [Hamm, 2008].

### 3.3.4.2 Grenzwerte nach [DIN 1052]

„Bei Decken unter Wohnräumen sollten, um Unbehagen verursachende Schwingungen zu vermeiden, die am ideellen Einfeldträger ermittelten Durchbiegungen  $w_{G,inst} + \psi_2 \cdot w_{Q,inst}$  (Gleichung 2-43) aus ständiger und quasi-ständiger Einwirkung auf  $6 \text{ mm}$  begrenzt werden. Die Spannweite des Einfeldträgers ist bei Mehrfeldträgern die größte Feldweite  $\ell$ . Die elastische Einspannung in Nachbarfelder darf bei der Berechnung der Durchbiegung  $w_{G,inst} + \psi_2 \cdot w_{Q,inst}$  berücksichtigt werden.“

$$w_{perm} \leq 6 \text{ mm} \qquad \text{Gleichung 3-4}$$

Nach Umrechnung mit Gleichung 2-42 steckt hinter dieser Durchbiegungsbeschränkung (Gleichung 3-4) eine Frequenzbegrenzung auf mindestens  $7,2 \text{ Hz}$ , vgl. Gleichung 3-5.

$$f_{e,perm} \geq 7,2 \text{ Hz} \qquad \text{Gleichung 3-5}$$

### 3.3.4.3 Grenzwerte nach [Erläuterungen]

Die Durchbiegungsbegrenzung nach Gleichung 3-4 auf  $6 \text{ mm}$  ist unabhängig von der Spannweite der Decke einzuhalten. Vor allem bei Decken mit großen Spannweiten wird diese Forderung bemessungsrelevant.

Nach den [Erläuterungen] können Decken mit Eigenfrequenzen kleiner  $7,2 \text{ Hz}$  ausgeführt werden. Die Eigenfrequenz der Decke unter quasi-ständiger Einwirkung  $f_{e,perm}$  sollte jedoch mindestens  $6 \text{ Hz}$  betragen:

$$f_{e,perm} \geq 6,0 \text{ Hz} \quad \text{Gleichung 3-6}$$

Bei einem Einfeldträger entspricht das einer Durchbiegung von

$$w_{perm} \leq 9 \text{ mm} \quad \text{Gleichung 3-7}$$

#### 3.3.4.4 Grenzwerte nach [Eurocode 5]

Wohnungsdecken sollten unter ständigen Einwirkungen eine Eigenfrequenz von mindestens 8 Hz aufweisen:

$$f_e \geq 8,0 \text{ Hz} \quad \text{Gleichung 3-8}$$

Bei einem Einfeldträger entspricht das einer Durchbiegung unter Gleichlast (wieder unabhängig von der Spannweite) von:

$$w \leq 5 \text{ mm} \quad \text{Gleichung 3-9}$$

Für Decken mit Eigenfrequenzen kleiner als 8,0 Hz sind genauere Untersuchungen zu führen, die jedoch im Eurocode nicht weiter erläutert werden.

#### 3.3.4.5 Gegenüberstellung von [DIN 1052] und [Eurocode 5]

Werden die Frequenzkriterien nach [DIN 1052] und [Eurocode 5] gegenübergestellt, so erhält man Folgendes:

Tabelle 3-1 Gegenüberstellung [DIN 1052] und [Eurocode 5]

	Einwirkung	Mindesteigenfrequenz
[DIN 1052]	$g + \psi_2 \cdot p = g + 0,3 \cdot p$	7,2 Hz
[Eurocode 5]	$g$	8,0 Hz

Die Einwirkung (Masse) steht bei der Frequenzberechnung unter der Wurzel, weshalb sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$\sqrt{\frac{g}{g + 0,3 \cdot p}} = \frac{7,2}{8,0} \text{ und daraus ein Verhältnis von Eigenlast zu Verkehrslast von } \frac{g}{p} = 1,28,$$

ab welchem sich eine Berechnung nach DIN 1052 als vorteilhafter erweist.

Bei einer Verkehrslast von  $p=2,0 \text{ kN/m}^2$  entspricht das einer Eigenlast von  $g=2,56 \text{ kN/m}^2$ , also in etwa dem „schweren“ Aufbau in den in Kapitel 6 beschriebenen Laboruntersuchungen.

### 3.3.5 Begrenzung der Schwingbeschleunigung bzw. der Schwinggeschwindigkeit

#### 3.3.5.1 Allgemeines

Der Nachweis der Schwingbeschleunigung wird nur in den [Erläuterungen] nach [DIN 1052] und nur für Decken im Frequenzbereich zwischen  $6 \text{ Hz}$  und  $7,2 \text{ Hz}$  gefordert. Mit diesem Nachweis wird die Tatsache berücksichtigt, dass bei Frequenzen kleiner als ca.  $8 \text{ Hz}$  die Schwingbeschleunigung, bei Frequenzen größer als  $8 \text{ Hz}$  die Schwinggeschwindigkeit verstärkt wahrgenommen wird, vgl. Abbildung 2-7.

Im Gegensatz dazu werden im [Eurocode 5] nur Decken mit Frequenzen über  $8 \text{ Hz}$  behandelt, entsprechend werden dort die Schwinggeschwindigkeiten untersucht.

Nach den Erfahrungen der Autorinnen wird der Nachweis der Geschwindigkeit bei Holzdecken mit „üblichem“ Schallschutzaufbau jedoch nicht maßgebend. Vereinfachend kann man sich dann auf die Nachweise von Eigenfrequenz und Steifigkeit beschränken.

#### 3.3.6 Grenzwerte der Schwingbeschleunigung nach [DIN 1052] bzw. [Erläuterungen]

Die Beschleunigung der Decke infolge eines Gehers sollte nicht größer sein als  $0,1 \text{ m/s}^2$ , vgl. Gleichung 3-10. Dieser Nachweis kann nur von sehr schweren und / oder Decken mit großer mitschwingender Masse (Breite bzw. Spannweite) erfüllt werden. Nach den Erfahrungen der Autorinnen ist das Einhalten dieses Nachweises nicht erforderlich, wenn ein Aufbau mit schwimmend gelagertem Nassestrich bzw. Trockenestrich mit Splittschüttung vorhanden ist (und die Nachweise Eigenfrequenz und Steifigkeit eingehalten sind).

$$a \leq 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Gleichung 3-10

Zur Berechnung der Beschleunigung nach Gleichung 2-48 bzw. Gleichung 2-49 wird von Resonanz zwischen der Eigenfrequenz und der dritten Harmonischen ausgegangen, d.h. von einer Schrittfrequenz gleich 1/3 der Eigenfrequenz.

### 3.3.6.1 Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit nach [Eurocode 5]

Nach [Eurocode 5] wird für Decken mit Eigenfrequenzen größer 8 Hz die Schwinggeschwindigkeit nach Gleichung 3-11 bis Gleichung 3-13 untersucht. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde festgestellt, dass dieses Kriterium nur äußerst selten maßgebend wird (siehe oben und Kapitel 8 und 11).

$$v \leq b^{(fe^{1-D}-1)} \quad [m/(Ns^2)] \quad \text{Gleichung 3-11}$$

$v$  ist die Geschwindigkeit nach einem Einheitsimpuls (Einheitsimpuls geschwindigkeitsreaktion in  $[m/(Ns^2)]$ ) und darf für rechteckige, an allen Rändern gelenkig gelagerte Decken nach Gleichung 2-43 berechnet werden.

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot \ell + 200} \quad \text{Gleichung 3-12}$$

$n_{40}$  ist die Anzahl der Schwingungen 1. Ordnung mit einer Resonanzfrequenz bis zu 40 Hz:

$$n_{40} = \left\{ \left[ \left( \frac{40}{f_{\text{Balken}}} \right)^2 - 1 \right] \cdot \left( \frac{b}{\ell} \right)^4 \cdot \frac{(EI)_{\text{Längs}}}{(EI)_{\text{Quer}}} \right\}^{0,25} \quad \text{Gleichung 3-13}$$

$(EI)_{\text{Längs}}$  bzw.  $(EI)_{\text{Quer}}$  sind die äquivalenten Plattenbiegesteifigkeiten der Decke in Längs- bzw. in Querrichtung mit  $(EI)_{\text{Längs}} \geq (EI)_{\text{Quer}}$ ,

$f_{\text{Balken}}$  ist die erste Eigenfrequenz des Systems, bei Einfeldträgern nach Gleichung 2-35,

$D$  ist die Dämpfung nach Kapitel 8 bzw. den [Erläuterungen],

$b$  in Gleichung 3-12 und Gleichung 3-13 ist die Deckenfeldbreite

$b$  in Gleichung 3-11 ist der Grenzwert nach Abbildung 3-5, empfohlen wird hier  $b = 150$ .

### 3.3.6.2 Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit nach [Kreuzinger / Mohr, 1999]

Nach [Kreuzinger / Mohr, 1999] sollte der Grenzwert für die Einheitsimpulsgeschwindigkeitsreaktion auf ein Drittel reduziert werden, vgl. Gleichung 3-14.

$$v \leq \frac{1}{3} \cdot b^{(fe^{1-D-1})} \quad [m/(Ns^2)] \quad \text{Gleichung 3-14}$$

### 3.3.6.3 Grenzwerte der Schwinggeschwindigkeit infolge Heeldrop für Vergleich mit Messwerten

Weil der Einheitsimpuls eine theoretische, unter normalen Bedingungen nicht erzeugbare Größe ist, wird in [Kreuzinger / Mohr, 1999] vorgeschlagen, den Vergleich über die Geschwindigkeit nach einem Heeldrop (Gleichung 2-48 und Gleichung 2-49) zu führen. Der Heeldrop wird durch einen Impuls mit 55 Ns beschrieben. Im Unterschied zum Einheitsimpuls ist die Einwirkzeit größer 0 sec., die Antwort ist abhängig vom Kraft-Zeit-Verlauf und dem Plötzlichkeitsgrad. Deshalb kann der Grenzwert nicht linear zum Einheitsimpuls umgerechnet werden.

In den [Erläuterungen] und in [Kreuzinger / Mohr, 1999] wird als Grenzwert für die Geschwindigkeit nach einem Heeldrop der 6-fache Wert der Einheitsimpulsgeschwindigkeitsreaktion (Gleichung 3-15) vorgeschlagen.

$$v_{\text{Heeldrop}} \leq 6 \cdot b^{(fe^{1-D-1})} \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad \text{Gleichung 3-15}$$

## 3.3.7 Steifigkeitskriterium

### 3.3.7.1 Allgemeines

Im Rahmen der Untersuchungen in [Kreuzinger / Mohr, 1999] und im beschriebenen Vorhaben wurde festgestellt, dass das Steifigkeitskriterium mindestens ebenso wichtig einzustufen ist wie das Frequenzkriterium. Dabei sollte die Steifigkeit der Decke so hoch sein, dass die Durchbiegung unter einer Kraft in Feldmitte einen bestimmten Wert nicht übersteigt. Welcher Grenzwert verwendet wird, hängt vom System der Decke, von den Anforderungen des Bauherrn und der zugrunde gelegten Norm ab.

$$w_{stat}(1kN) \leq \text{Grenzwert}$$

Gleichung 3-16

Die Durchbiegung  $w_{stat}$  infolge der Kraft  $F = 1 \text{ kN}$  kann bei einer Platte vereinfachend für einen  $1 \text{ m}$  breiten Plattenstreifen berechnet werden. Für eine genauere Betrachtung kann für einachsige gespannte Platten die mitwirkende Plattenbreite  $b_{ef}$  nach Gleichung 2-40 berücksichtigt werden. Zweiachsige gespannte Platten können als Trägerrost berechnet werden. Nachgiebige Lagerungen auf Unterzügen sind zu berücksichtigen.

### 3.3.7.2 Grenzwerte nach [DIN 1052] bzw. [Erläuterungen]

In den [Erläuterungen] und in [Hamm, 2006] sind unterschiedliche Grenzwerte genannt, vgl. Tabelle 3-2. Welche Grenzwerte für die Durchbiegung infolge einer an ungünstiger Stelle wirkende Einzellast von  $F_k = 1 \text{ kN}$  verwendet werden, muss mit dem Bauherrn vereinbart werden. Dabei besteht die Schwierigkeit, diese Grenzwerte in ein dem Bauherrn verständliches Schwingungsverhalten zu "übersetzen".

$$w_{stat}(1kN) \leq 0,25..0,5..1,0 \text{ mm}$$

Gleichung 3-17

Tabelle 3-2 Grenzwerte für Untersuchung zur Steifigkeit

Grenzwert für Steifigkeit \ Statisches System	Durchlaufträger mit	Einfeldträger mit
$w(1 \text{ kN}) \leq 1,0 \text{ mm}$	-	geringer Anforderung
$w(1 \text{ kN}) \leq 0,5 \text{ mm}$	geringer Anforderung	höherer Anforderung
$w(1 \text{ kN}) \leq 0,25 \text{ mm}$	höherer Anforderung	sehr hoher Anforderung

### 3.3.7.3 Variable Grenzwerte nach [Eurocode 5]

[Eurocode 5] sieht variable Grenzwerte für den Schwingungsnachweis vor, vgl. Abbildung 3-5 (Grenzwerte für die Durchbiegung infolge einer an ungünstiger Stelle wirkende Einzellast von  $F_k = 1 \text{ kN}$ ):

Richtung 1 bedeutet „besseres Verhalten“ und Richtung 2 „schlechteres Verhalten“.

Erfahrungsgemäß ist es sehr empfehlenswert, die Werte im Bereich 1 einzuhalten, d. h.  $a = 0,5 \dots 1,0 \text{ mm}$  (entsprechend Tabelle 3-2), bei sehr hohen Anforderungen auch  $0,25 \text{ mm}$ .

$$\frac{w}{F} \leq a \quad [\text{mm} / \text{kN}]$$

Gleichung 3-18

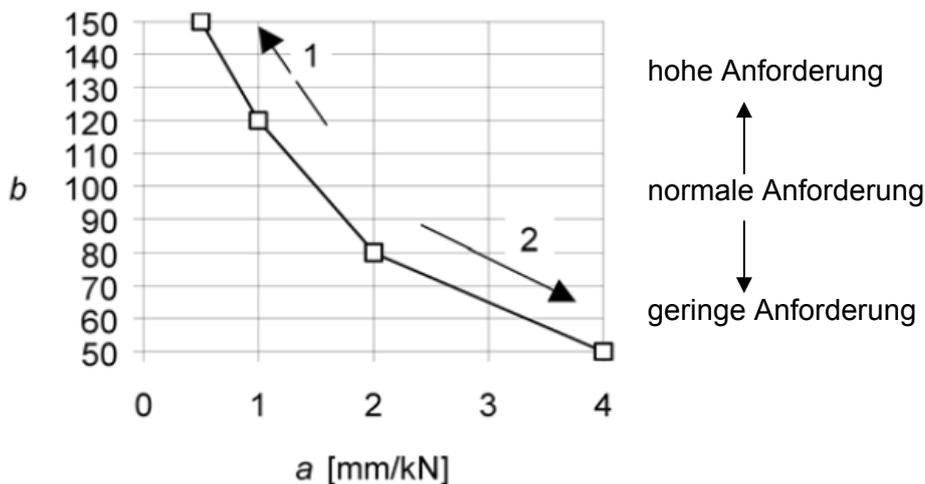


Abbildung 3-5 Empfohlene Bereiche für die Grenzwerte nach [Eurocode 5]

## 4 Kriterien zur (subjektiven) Bewertung des Schwingungsverhaltens

### 4.1 Allgemeines

Ein wesentliches Ziel des Vorhabens lag darin, einen Zusammenhang zwischen den Systemkenngrößen und dem zu erwartenden Schwingungsverhalten herzustellen. Dafür wurden die gemessenen Decken von den Projektbearbeiterinnen bewertet. Zusätzlich erfolgten Nutzerbefragungen bei bereits genutzten Decken sowie eine Bewertung durch die an der Bearbeitung beteiligten studentischen Hilfskräfte.

Im folgenden Kapitel werden Erkenntnisse zur menschlichen Wahrnehmung des Schwingungsverhaltens dargestellt. Im Anschluss erfolgt die Beschreibung, der im Forschungsvorhaben zu Grunde gelegten Bewertungskriterien.

### 4.2 Empfindlichkeit des Menschen gegenüber Schwingungen

Wesentliche Einflussfaktoren auf das menschliche Empfinden sind:

- die Amplitude einer Schwingung,
- die Frequenz sowie
- die Dauer der Schwingung (Anzahl der Auf- und Abbewegungen), die durch die Dämpfung beeinflusst wird.

In Abhängigkeit von der Eigenfrequenz der Decke wird deren Schwingungsverhalten unterschiedlich wahrgenommen. Bei kleineren Frequenzen (bis ca. 8 Hz) ist das (Un-) Wohl-Empfinden von der Beschleunigung, bei größeren Frequenzen (ab ca. 8 Hz) von der Geschwindigkeit abhängig [Ohlsson, 1982] und [Hu, 2004]. Abbildung 2-7, die sog. „Basiskurve“ aus [ISO 2631-2] verdeutlicht den Zusammenhang. Die obere „grüne Grenze“ gilt als die Wahrnehmbarkeitsgrenze.

Die Wahrnehmung und das menschliche Empfinden von Schwingungen nehmen mit:

- zunehmender Schwingdauer zu,
- der Nähe zur und dem Bewusstsein über die Schwingursache ab,
- zunehmender Körpertätigkeit ab,
- zunehmender Gewöhnung ab.

Dementsprechend werden die personen-induzierten Anregungen zur Beschreibung des Schwingungsverhaltens in drei Kategorien unterteilt, vgl. [Kreuzinger / Mohr, 1999]. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die im Kapitel 2 ausführlich beschriebenen Anregungen.

Tabelle 4-1 Überblick über Personen-Induzierte Anregungen

Statisches System Grenzwert für Steifigkeit	
1) Einmalige Auslenkung durch Fußauftritt → Steifigkeitskriterium (Durchbiegung unter einer Einzellast in Feldmitte)	Damit ist eine einmalige Anregung durch einen länger andauernden Impuls mit anschließendem Abklingen der Schwingung gemeint, hervorgerufen durch z. B. einen einmaligen Fußauftritt.
2) Oft wiederholte Anregung durch Schritte → Schwingbeschleunigung	Personen geben beim Gehen, Laufen, Hüpfen, Tanzen etc. periodische Kräfte auf den Untergrund ab. Bei oft wiederholten Anregungen mit einer Anregungsfrequenz (= Schrittfrequenz) gleich der Hälfte oder einem Drittel der Eigenfrequenz, kann Resonanz entstehen. Die Decke kann sich aufschaukeln, da die Schwingungsamplitude durch Resonanz stark erhöht wird. Einflussfaktoren für die Erhöhung sind die Masse und die Dämpfung der Decke.
3) Kurzer Impuls durch Heeldrop → Schwinggeschwindigkeit	Gemeint ist eine einmalige Anregung durch einen Impuls mit kurzer Einwirkungsdauer, wie z. B. beim Heeldrop (= Fersenauftritt). Beim Fersenauftritt, in der Literatur und im Folgenden mit Heeldrop bezeichnet, stellt sich die Versuchsperson auf die Zehenspitzen und lässt sich auf die Fersen fallen. Vorteil des Heeldrops ist, dass er innerhalb einer Messreihe relativ gut reproduzierbar ist. Allerdings kann die Größe des erzeugten Impulses schwanken je nach Untergrund, Schuhwerk, Masse der Versuchsperson etc.

### 4.3 Entwicklung Bewertungsschema

Um Konstruktions- und Bemessungsregeln ableiten zu können, werden alle gemessenen Decken mit Messgrößen, aber auch subjektiv bewertet. In Tabelle 4-2 ist das verwendete Bewertungsschema nach Beurteilungsstufen (1-4) und in Worten wiedergegeben.

Tabelle 4-2 *Bewertungsstufen und Bewertungskriterien*

Beurteilung	In Worten	
1	Schwingungen kaum spürbar	nicht störend
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

Die Bewertungskriterien sind aus dem Bericht [Kreuzinger / Mohr 1999] übernommen worden, so dass die in-situ-Messergebnisse aus dem Bericht (20 Messungen) in die Zusammenstellung in Abbildung 5-2 und Anhang B aufgenommen werden konnten.

### 4.4 Schwingungssteg bei der Firma Bauer Holzbau GmbH

Der Schwingungssteg wurde als „Modell“ für potentielle Holzhausbau-Kunden entwickelt, um einen Eindruck von 6,0 Hz bzw. 7,2 Hz als Eigenfrequenz für die Decke zu gewinnen und das Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Mehrkosten abschätzen zu können. Durch Veränderung der Spannweite wird die Eigenfrequenz des Steges variiert.

Im Rahmen eines Treffens des projektbegleitenden Ausschusses wurde dieser Steg von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe hinsichtlich des subjektiven Empfindens bewertet.

Tabelle 4-3 zeigt eine Zusammenstellung der Einwirkungen einer "üblichen" Decke im Holzhausbau.

Der Schwingungsnachweis wird für ständige und quasi- ständige Einwirkung geführt:

$$g + \psi_2 \cdot p = 2,15 + 0,4 + 0,3 \cdot 2,0 = 3,15 \text{ kN} / \text{m}^2$$

Der Nachweis wird für DuoLam-Balken mit  $E_{mean} = 11.600 \text{ MN/m}^2$  geführt.

Tabelle 4-3 Eigenlast und Verkehrslast für „übliche“ Decken

Schicht		Flächenlast
Zementestrich 60 mm	$22,00 \cdot 0,06 =$	1,32 kN/m <sup>2</sup>
Schüttung 40 mm	$15,00 \cdot 0,04 =$	0,60 kN/m <sup>2</sup>
Wärme-/Trittschalldämmung		0,06 kN/m <sup>2</sup>
OSB-Platte 12 mm	$6,00 \cdot 0,012 =$	0,072 kN/m <sup>2</sup>
Sichtschalung 19 mm	$5,00 \cdot 0,019 =$	0,095 kN/m <sup>2</sup>
Eigengewicht ohne Deckenbalken	$g =$	<u>2,15 kN/m<sup>2</sup></u>
Deckenbalken	$5,00 \cdot 0,1 \cdot 0,24 / 0,3 =$	0,40 kN/m <sup>2</sup>
Verkehrslast	$p =$	<u>2,00 kN/m<sup>2</sup></u>

Der verfügbare Platz für die Schwingungsstege ist 6 m Länge und 0,64 m Breite. Würde man die Masse auf nur einen 0,64 m breiten Streifen aufbringen, hätte der Schwingungssteg eine zu geringe Masse (im Vergleich zu einer eingebauten Decke). Der Effekt der **höheren Masse im eingebauten Zustand** kann simuliert werden, indem der Deckenstreifen mit einer höheren flächenbezogenen Masse ausgeführt wird. Wenn man davon ausgeht, dass im eingebauten Zustand die halbe Raumbreite mitschwingt, so sind das bei einer Raumbreite von 4 m mitschwingende Breite von 2 m, vgl. Abbildung 4-1.

Die flächenbezogene höhere Masse wird durch zwei Lagen Stahlsandsäcke erreicht.

$$g + \psi_2 \cdot p = 2,15 + 0,4 + 0,3 \cdot 2,0 = 3,15 \text{ kN/m}^2 \text{ bei } 2,0 \text{ m mitschwingender Breite}$$

$$3,15 \cdot 2,0 \div 0,64 = 9,84 \text{ kN/m}^2 \text{ bei } 0,64 \text{ m Breite}$$

$$9,84 \cdot 0,64 = 6,30 \text{ kN/m}$$

Maximale Balkenanordnung auf ganzer Fläche (0,64m Breite, 0,24m Höhe):

rechnerische Biegesteifigkeit:

$$EI = 11600 \cdot \frac{0,64 \cdot 0,24^3}{12} = 8,55 \text{ MNm}^2$$

rechnerische Eigenfrequenz bei Spannweite:

$$f = \frac{\pi}{2 \cdot \ell^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} = \frac{\pi}{2 \cdot \ell^2} \cdot \sqrt{\frac{8,55 \cdot 10^6}{630}} = \begin{cases} 7,2 \text{ Hz} \\ 6,0 \text{ Hz} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \ell = 5,04 \text{ m} \\ \ell = 5,52 \text{ m} \end{cases}$$

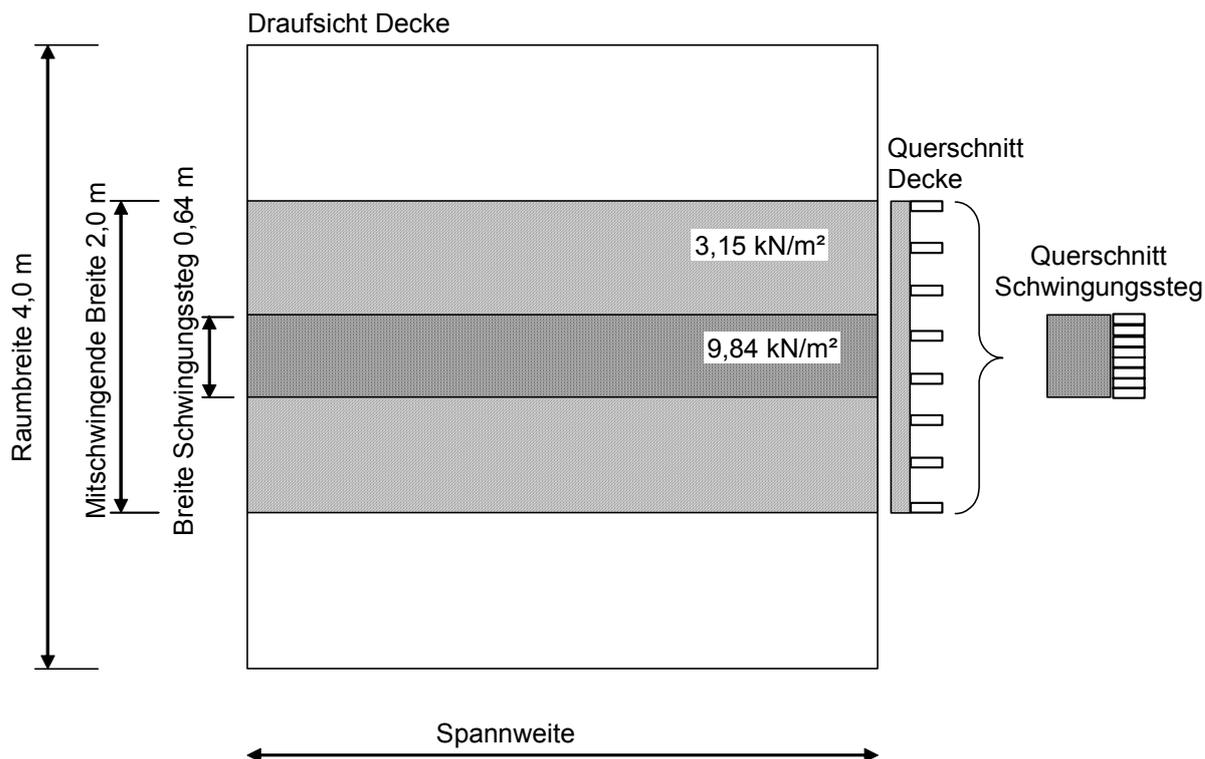


Abbildung 4-1  
Schematische Darstellung der mitschwingenden Masse einer Decke – angewandt beim Schwingungssteg

Tabelle 4-4 Aufbau der Schwingungsstege von oben nach unten:

Lage	Abmessungen	Gewicht
OSB- Platte 12mm	$6,00 * 0,012 * 0,64 =$	0,046 kN/m
2. Lage Stahlsandsäcke alle 25 cm	$2 \times 25 \text{kg} / 0,25 \text{m} =$	2,00 kN/m
1. Lage Stahlsandsäcke alle 25 cm	$2 \times 25 \text{kg} / 0,25 \text{m} =$	2,00 kN/m
OSB- Platte 12 mm	$6,00 * 0,012 * 0,64 =$	0,046 kN/m
Schüttung 100 mm	$15,00 * 0,10 * 0,64 =$	0,96 kN/m
Schüttung 40 mm	$15,00 * 0,04 * 0,64 =$	0,38 kN/m
OSB- Platte seitlich	$6,00 * 2 * 0,022 * 0,555 =$	0,15 kN/m
Balken 8x80x240 mm <sup>2</sup>	$5,00 * 0,24 * 0,64 =$	(0,77 kN/m)
Balken 8x80x240 mm <sup>2</sup> , gewogen	$4,00 / 6,00 =$	0,67 kN/m
<b>Summe</b>		<b>6,25 kN/m</b>

Abbildung 4-2 zeigt die Herstellung des Schwingungssteges.



*Abbildung 4-2  
Stirnseite der Tragbalken des Schwingungssteigs und Einbringen der Schüttung*

## 4.5 Ergebnis

Die subjektive Bewertung wurde in Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses nach Begehung des Schwingungssteiges in drei Anforderungsklassen nach der Art der Nutzung eingeteilt:

- hohe Anforderungen  
(z.B. Wohnungstrenndecken und Decken in Büros mit PC-Nutzung, Labore, Versammlungsräume)
- normale Anforderungen  
(z.B. Decken in Einfamilienhäusern)
- keine Anforderungen  
(z.B. nicht genutzte Räume, Dachböden, nicht begehbare Räume)

Im Anschluss erfolgte gemeinsam eine Zuordnung der „Bewertungs-Noten“ zu den Nutzungen, vgl. Tabelle 4-5.

Tabelle 4-5 Zusammenhang zwischen Nutzung und Bewertung (subjektiv)

Anforderungen an das Schwingungsverhalten in Abhängigkeit von der Nutzung	Subjektive Beschreibung	Bewertung
Erhöhte Anforderungen (z.B. Wohnungstrenndecken, Decken in Büros mit PC-Nutzung)	Schwingungen sind gar nicht oder nur gering spürbar, wenn man sich darauf konzentriert und nicht störend	1 bis 1,5
Normale Anforderungen = STANDARD (z.B. Decken in EFH)	Schwingungen sind spürbar, sollten jedoch nicht störend sein	$> 1,5$ und $\leq 2,5$
Keine Anforderungen (z.B. nicht begehbare Decken in nicht genutzten DG, im Bestand, mit Zustimmung durch Bauherr)	Schwingungen spürbar bis deutlich spürbar, unangenehm bzw. störend	$> 2,5$

Aktuell findet auf Grund der Forschungsergebnisse in der Fachwelt eine Meinungsbildung über die Definition von Decken-Schwingverhaltensklassen statt, die klare, einfache Bauvertragsregelungen zwischen Planern und Bauherren ermöglichen wollen bzw. sollen.

Das subjektive Empfinden des Schwingungsverhaltens wird durch die eingangs erwähnten Randbedingungen beeinflusst. So wirken auch auf die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Decken z.B. folgende Einflüsse ein:

- Anzahl der Personen auf der Decke,
- Umgebung (Labor oder eingerichtetes Umfeld (wenn ja, wie hochwertig oder gepflegt) oder noch Bauzustand),
- Geräuschkulisse (auch: Trennung von Schall und Spüren),
- Beeinflussung durch Dritte, z. B. Nutzer oder Planer oder Fremde,
- Tagesform des Nutzers / Bewertenden,
- Raumgröße und
- Fußbodenbelag.

Zur Kontrolle bzw. Skalierung der Bewertung wurden regelmäßig Decken von beiden Bearbeiterinnen bewertet. Dabei fand der Austausch zum Ergebnis erst nach erfolgter Bewertung statt. Dabei traten Abweichungen in der Bewertung von maximal einem halben Punkt nach oben oder unten auf, so dass die zugrunde gelegte Auswertung und Zuordnung von Bewertung zu Grenzwerten als ausreichend genau angesehen wird.



## 5 In-situ-Messungen

### 5.1 Allgemeines

Die in-situ-Messungen waren wichtig, um einen Überblick über die große Bandbreite an Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken zu gewinnen. Die Vielfalt der untersuchten Decken-Konstruktionen ließ sich nur auf diesem Wege in die Forschung einbringen, da die Decken im Labor aus Kostengründen nur begrenzt variiert werden konnten.

Die in-situ-Messungen waren vor allem wichtig für die Bewertung des Schwingungsverhaltens im Nutzungszustand. Das folgende Kapitel beschreibt den Ablauf der in-situ-Messungen, gibt einen Überblick über die untersuchten Objekte einschließlich ihrer Nutzungen.

Die Ergebnisse sind im Anhang B dargestellt. Eine detaillierte Auswertung erfolgt zusammen mit den im Labor untersuchten Decken im Kapitel 8.

### 5.2 Messtechnik

Für alle in-situ-Messungen wurde ein mobiles Mess-System verwendet, um die Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit aufzuzeichnen.

Das System mit (maximal) drei Sensoren bestand aus folgenden Komponenten:

- Beschleunigungsaufnehmer MS 2004+ der Fa. SYSCOM mit einem Messbereich bis  $20 \text{ m/s}^2$ ,
- Erschütterungsaufzeichnungssystem MR 2002-CE der Fa. SYSCOM.
- Die Daten wurden mit der Software [WinCom] erfasst und mit der Software [VIEW] (beides Fa. SYSCOM) bzw. [EXCEL] ausgewertet.



Abbildung 5-1  
Die verwendete Messausrüstung: Beschleunigungsaufnehmer, Recorder und Laptop.

### 5.3 Anregung und Ablauf der Messungen

Der Ablauf einer Messung wurde wie folgt entwickelt:

- Messung der Eigenfrequenz durch einen Sprungversuch.
- Messung der Schwinggeschwindigkeit und Dämpfung infolge eines Heeldrops, vgl. Tabelle 4-1. Wegen der Abhängigkeit des Heeldrops vom Schuhwerk wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens immer die gleichen Schuhe verwendet.
- Messung der Schwingbeschleunigung infolge regellosen Gehens.
- Messung der Schwingbeschleunigung infolge Gehen oder Joggen in Resonanz (zweite oder dritte Harmonische), soweit möglich.
- Messung der Dämpfung infolge Fallenlassens eines Sandsacks (5 kg aus ca. 1,5m Höhe). Der Sandsack- Wurf wurde nicht jedes Mal durchgeführt. V .a. bei leichten Decken führte er zu Amplituden, die außerhalb des Messbereichs liegen (Abheben). Auch bei bewohnten Objekten wirkte er auf die Nutzer sehr unangenehm. Bei schweren Decken ist er ein sehr gutes Hilfsmittel.
- Subjektive Einschätzung der Schwingungen infolge des Heeldrops, des Sandsacks- Wurfs und infolge umhergehender Personen durch die Testpersonen.
- Befragung der Nutzer (falls schon genutzt) nach der Einschätzung ihrer Decke.
- Erfassung der geometrischen und statischen Randbedingungen (vorhandene Bauunterlagen) und Abgleich vor Ort.

### 5.4 Übersicht über die gemessenen Objekte und Decken

Insgesamt wurden 110 Decken gemessen (6 im Labor und 104 in situ) und 20 weitere Decken aus dem Forschungsvorhaben [Kreuzinger / Mohr, 1999] übernommen. Abbildung 5-1 zeigt die Aufteilung nach Konstruktionstypen. Damit wurde die geplante Anzahl an Messobjekten (30-50) deutlich überschritten, da die große Streubreite der Objekte und der Ergebnisse weitere Messungen erforderlich gemacht hatte.

Zwischenauswertungen der in-situ- und Labormessungen dienten als Grundlage zur Entscheidung der weiteren Objektauswahl. Sehr langwierig gestaltete sich die Suche nach Objekten mit Decken im niedrigen Frequenzbereich, bei denen tatsächlich in Resonanz mit der 2., oder 3. Harmonischen angeregt werden konnte. Diese wurden im Neubau nur in Holz-Beton-Verbundbauweise gefunden sowie als historische Einschubdecken im Altbau. Einige der Decken konnten sowohl im Rohbauzustand als auch später im ausgebauten Zustand gemessen werden.

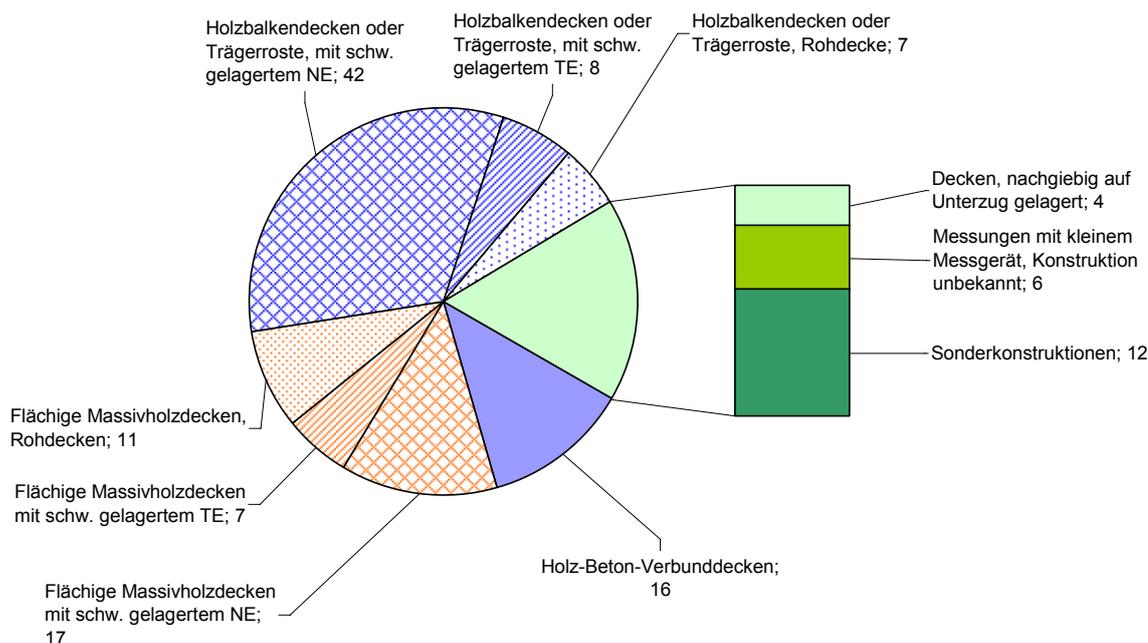


Abbildung 5-2

Überblick über die ausgewerteten Messungen (aus eigenen Labor- und in-situ-Messungen sowie aus [Kreuzinger/Mohr, 1999] übernommenen Daten)

Eine Übersicht über die gemessenen Objekte in Abhängigkeit von der Nutzung zeigt Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1 Übersicht über die in-situ-Messobjekte und -Messungen

Anzahl	Gebäude / Nutzung
47	Einfamilienhäuser
5	Mehrfamilienhäuser
24	Bürogebäude
8	Kindergärten
12	Schulen
8	sonstige Nutzung (Veranstaltung, Ausstellung, Galerie in Kaufhaus, Wohnheim, Restaurant)
6	aus Labormessungen
20	aus Bericht [Kreuzinger/ Mohr, 1999]
<u>130</u>	<u>insgesamt</u>

## 5.5 Bezeichnungssystematik für in-situ-Messungen

Die gemessenen Decken werden nach folgendem Schema bezeichnet:

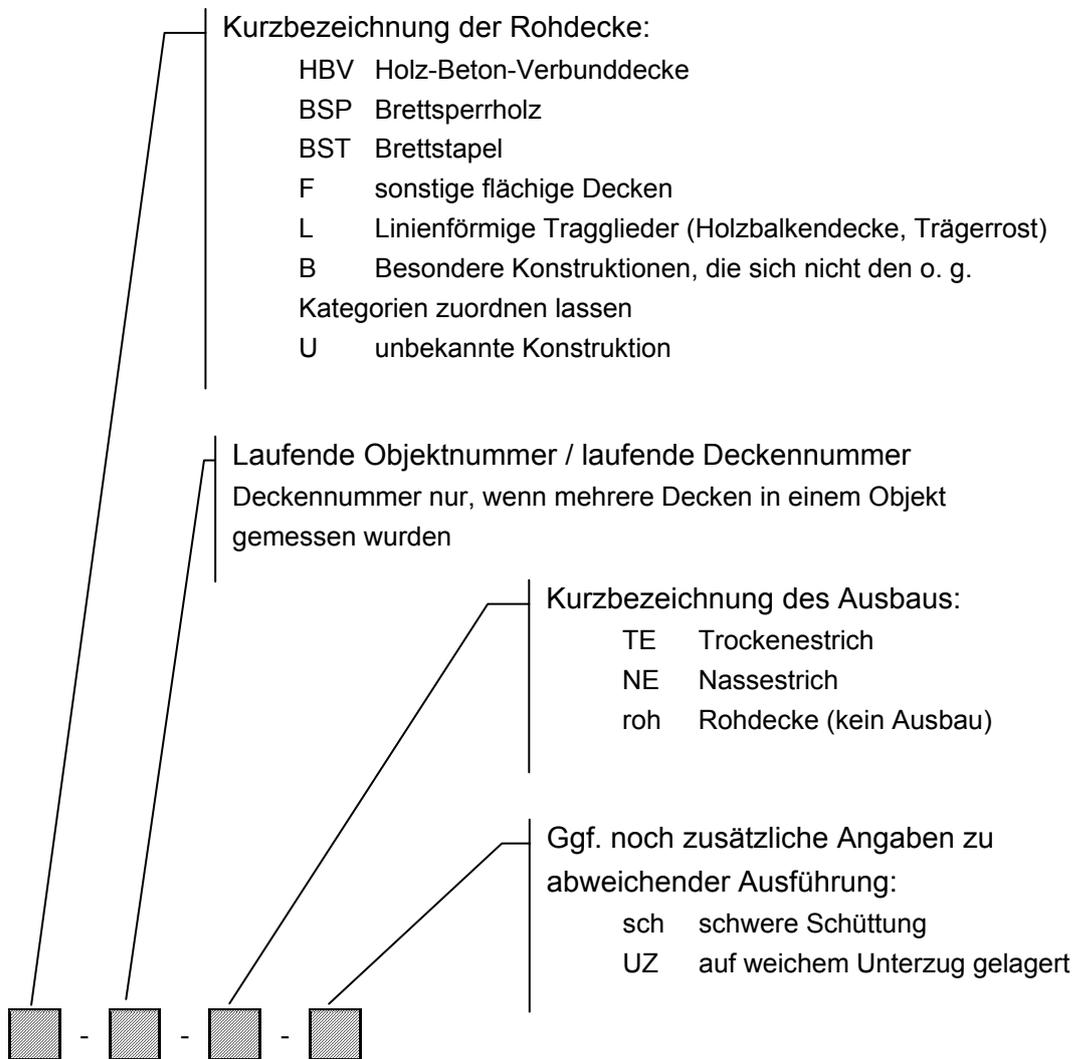


Abbildung 5-3  
Bezeichnungssystematik für in-situ-Messungen

## 5.6 Ausgewählte Beispiele und Einflüsse auf die Amplituden

### BSP-03/1-TE

In einem Bürobau wurden KLH- Massivholzplatten als teilweise punktgestützte Platten und auch als Wände und Wandscheiben verwendet. Auf den Decken wurden 5 cm Betonsteine aufgelegt, darauf ein aufgeständerter Boden mit Trockenestrichelementen ausgeführt. Im Hohlraum wurde Installationsleitungen verlegt.

Für die Messung wurde der Aufnehmer y auf den Doppelboden, der Aufnehmer x auf die Betonplatten gestellt und der Aufnehmer z unten an die Decke angehängt. Bis auf eine dünne Filzmatte ist keine Trittschalldämpfung vorhanden.

Beim Aufnehmer y (auf dem Doppelboden) sind hohe Frequenzen (im Bereich 100 Hz) zu messen, die bei den anderen Aufnehmern nicht vorhanden sind. Ansonsten sind die Amplitudenspektren sehr ähnlich. Die hohen Frequenzen auf dem Doppelboden führen zu zusätzlichen Erschütterungen.

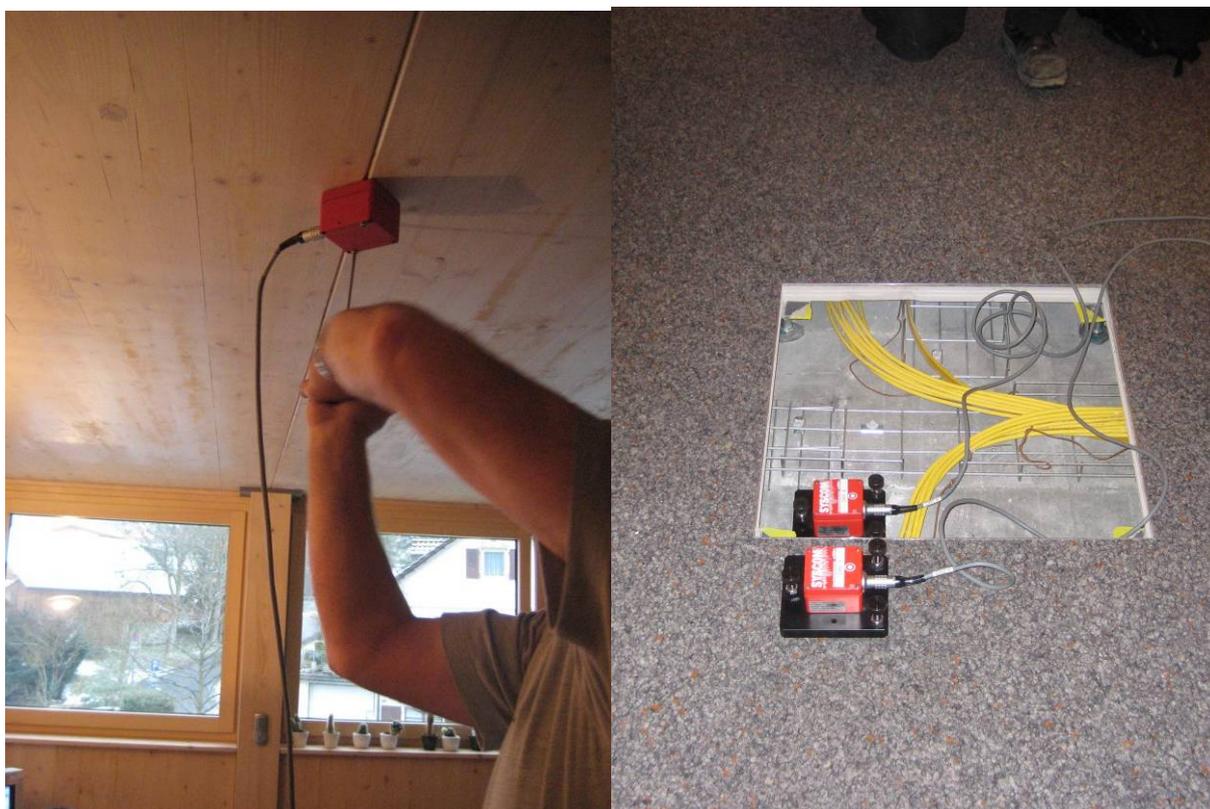


Abbildung 5-4

Messung BSP-03/1-TE: Aufnehmer z unten angehängt, Aufnehmer y auf Doppelboden (oben), Aufnehmer x auf Betonplatten (unten)

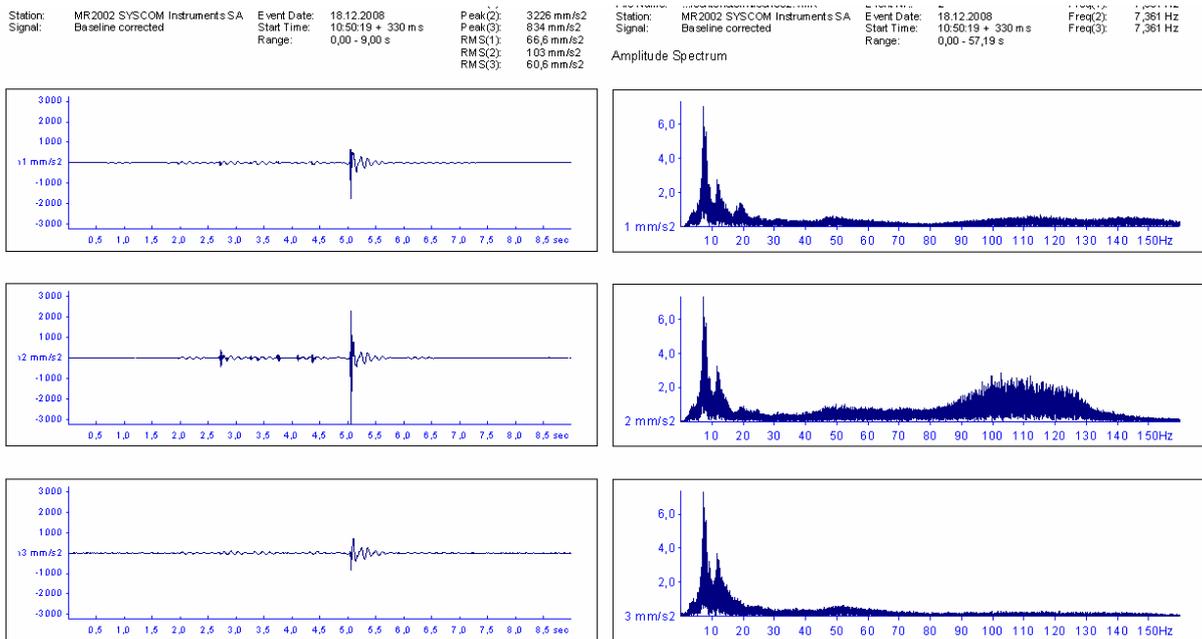


Abbildung 5-5  
Messung BSP-03/1-TE: Zeitschrieb Beschleunigung nach Heeldrop und Frequenzspektrum für die Kanäle x, y, z

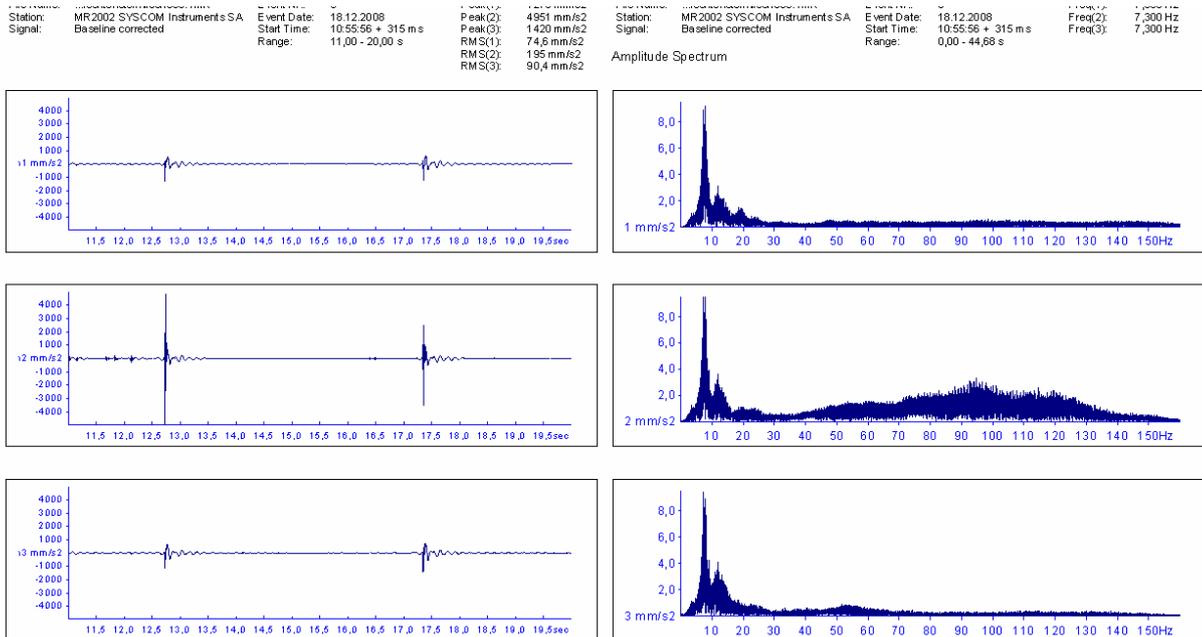


Abbildung 5-6  
Messung BSP-03/1-TE: Zeitschrieb Beschleunigung nach Heeldrop und Frequenzspektrum für die Kanäle x, y, z

### L-20/1-TE-sch

Die Decke besteht aus einer Holzbalken-Haupt-Nebenträgerkonstruktion. Die Hauptträger aus BS14 mit den Abmessungen  $b \times h = 18 \times 48 \text{ cm}^2$  sind Mehrfeldträger mit den Spannweiten 4,35 m – 1,8 m – 7,3 m – 3,05 m bzw. 4,35 m – 9,1 m – 3,05 m.

Zwischen den Hauptträgern spannen die Nebenträger: Vollholzbalken, S10 (=C24),  $b \times h = 6 \times 20 \text{ cm}^2$  mit einer Spannweite von 3,0 m. Die Nebenträger sind mit Balkenschuhen an den Hauptträgern befestigt. Die Oberkanten von Haupt- und Nebenträger sind auf gleicher Höhe. Auf den Holzbalken befindet sich eine OSB Platte. Im Bereich „Teppich“ folgen Knauf Fertigteilestrich- Elemente, darauf wieder eine OSB Platte und ein Teppichbelag. Im Bereich „OSB“ ist über der OSB Platte eine Trittschalldämmplatte aus Holzfasern, darauf wieder eine OSB Platte.

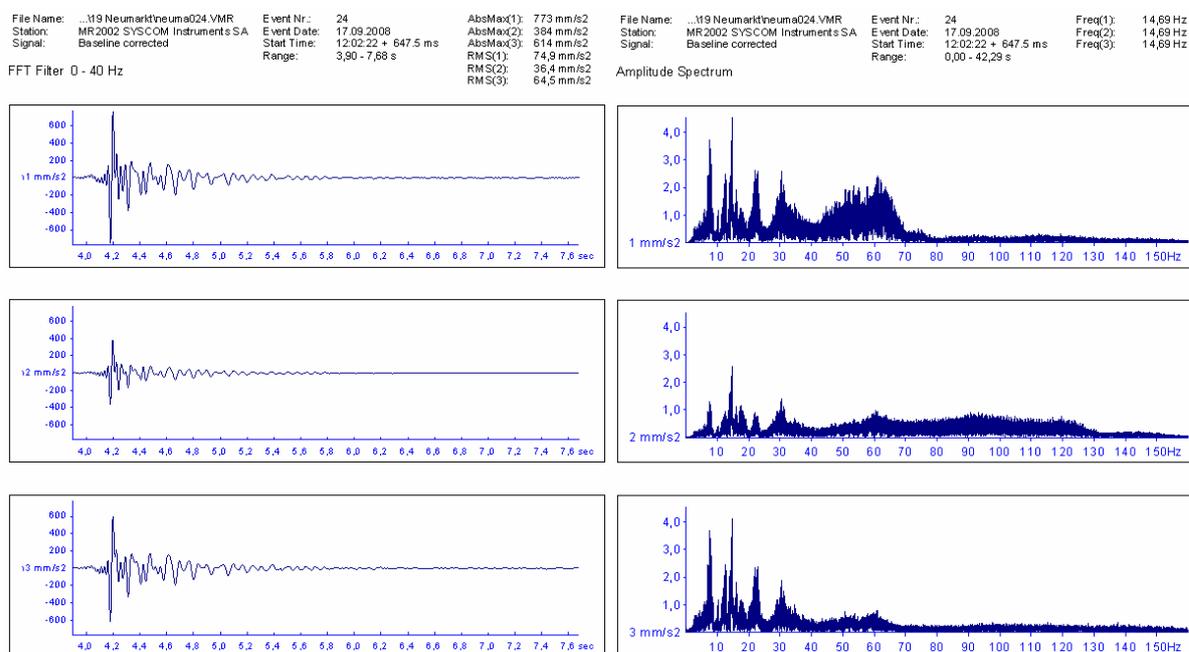


Abbildung 5-7

Messung L-20/1-TE-sch: Zeitschrieb Beschleunigung nach Heeldrop und Frequenzspektrum für die Kanäle x, y, z

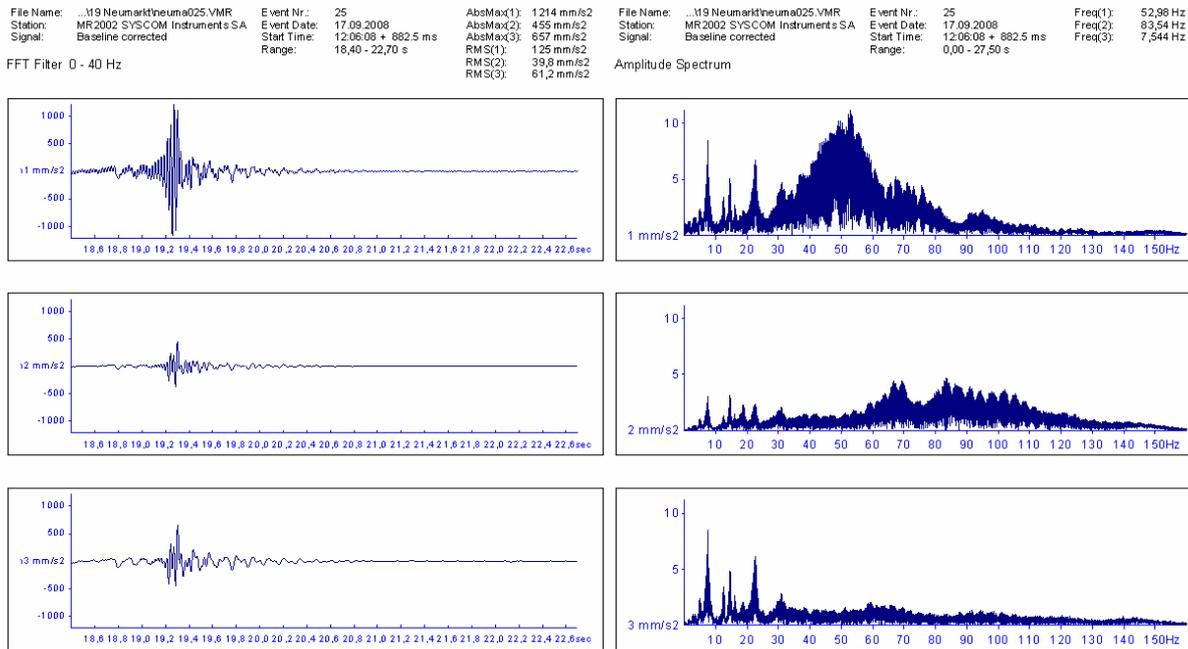


Abbildung 5-8

Messung L-20/1-TE-sch: Zeitschrieb Beschleunigung nach Sprung und Frequenzspektrum für die Kanäle x, y, z

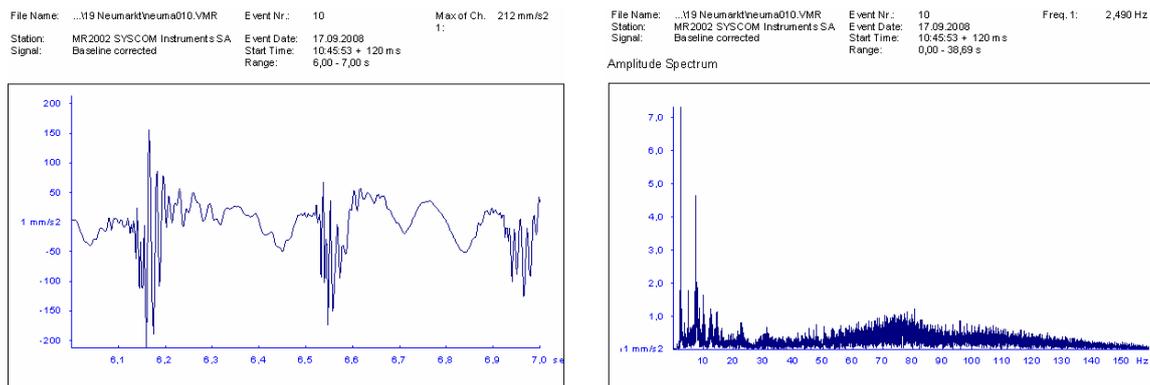


Abbildung 5-9

Messung L-20/1-TE-sch: Zeitschrieb Beschleunigung (1Sek.) und Frequenzspektrum für den Kanal x, Anregung Laufen mit 2,5 Hz ( $=f_e/3$ )

Der Aufnehmer x ist auf der Decke im Bereich Teppich, der Aufnehmer z direkt darunter angehängt, der Aufnehmer y ist auf Decke im Bereich ohne Teppich stehend. Es sind große Unterschiede zwischen x und z im Bereich der höheren Frequenzen. Bei größeren Amplituden (Sprungversuch) sind die Unterschiede zwischen auf und unter der Decke noch deutlicher.

Auf bei Anregung „Laufen mit dem Drittel der Eigenfrequenz“ sind im Zeitschrieb nicht nur die Schwingung in der Eigenform sondern hochfrequente Anteile aus den Auftritten zu sehen.

### BSP-04/1-roh

Die Decke aus KLH- Brettsperrholzplatten ist noch im Rohbauzustand. Die Anregung erfolgt durch „regelloses Gehen“, weil Schritte in Resonanz nicht möglich waren. Die Schritte wirken nicht als Resonanzanregung, sondern wie kleine Impulse. Weil die Masse und die Dämpfung klein waren, wurden die Schwingungen als störend wahrgenommen.

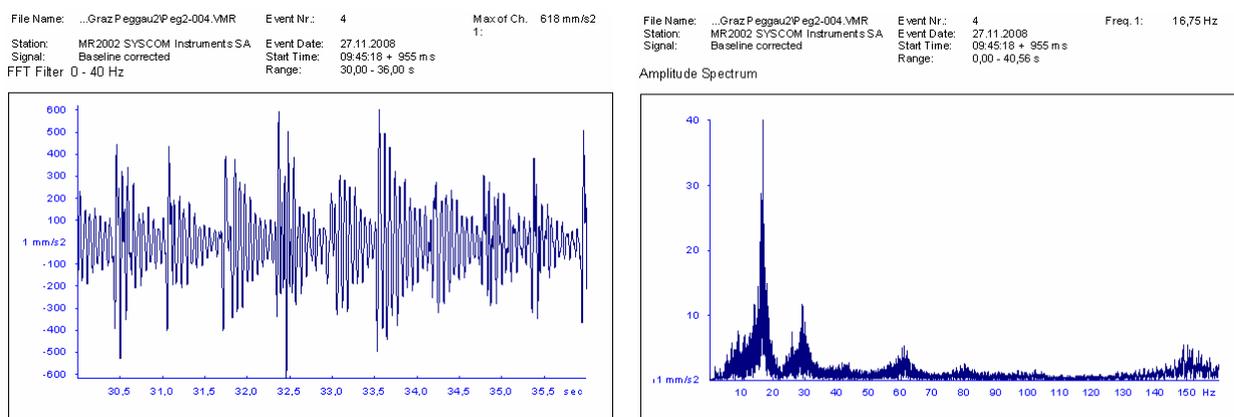


Abbildung 5-10

Messung BSP-04/1-roh: Zeitschrieb Beschleunigung Anregung „regelloses Gehen“ und Frequenzspektrum für den Kanal x

### BSP-01/1-NE-sch

Die Decke aus KLH- Brettsperrholzelementen hat einen Aufbau mit Zementestrich. Die Anregung erfolgte durch „regelloses Gehen“, weil Schritte in Resonanz nicht möglich waren. Die Schritte wirken wie kleine Impulse. Weil ausreichend Masse und Dämpfung vorhanden waren, wirkten die Schwingungen nicht störend.

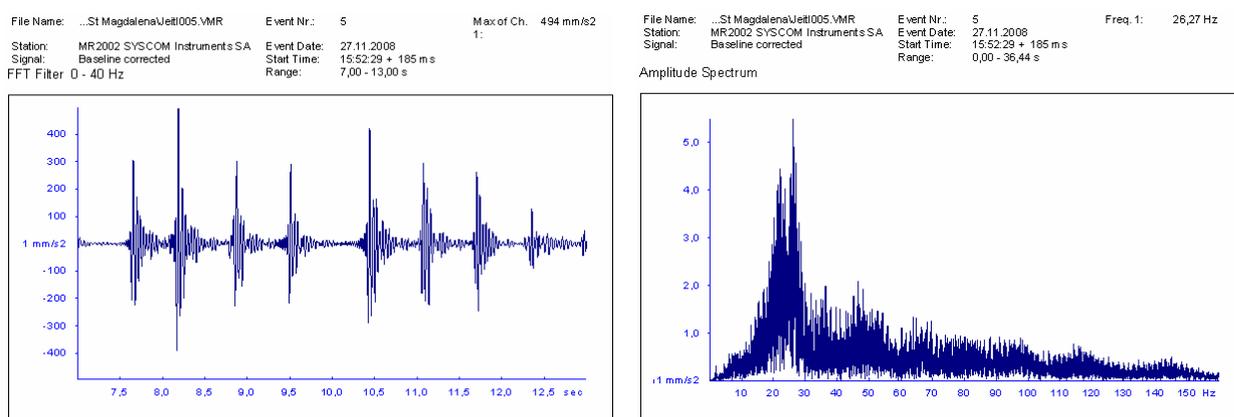


Abbildung 5-11

Messung BSP-01/1-NE-sch: Zeitschrieb Beschleunigung Anregung „regelloses Gehen“ und Frequenzspektrum für den Kanal x

## **5.7 Ergebnisse**

Die Ergebnisse der in-situ-Messungen sind in Anhang B zusammengestellt. Eine Wertung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 8.

## 6 Laboruntersuchungen

### 6.1 Allgemeines

Labormessungen werden zusätzlich erforderlich, da bei Messungen in situ Überlagerungseffekte aus unterschiedlichen, gleichzeitig vorhandenen Ausbaukonstruktionen und nicht erfassbare Randbedingungen vorhanden sind. Bei Labormessungen sind sowohl der Aufbau als auch die Lagerungsbedingungen genau bekannt und können fast beliebig variiert werden.

In der Versuchshalle der MFPA Leipzig GmbH erfolgte nacheinander der Aufbau von drei ca. 25 m<sup>2</sup> großen Deckenfeldern.

Anschließend wurden unterschiedliche Fußbodenaufbauten (Trocken- und Nassestrich, mit und ohne Schüttung) sowie Unterhangdecken an Federschienen und auf Lattung aufgebracht. Nach jedem Arbeitsschritt erfolgte die Anregung, Messung und Bewertung der Decke. Zusätzlich wurden zwei Rohdecken als Durchlaufplatte über zwei Felder mit Kragarm untersucht. Diese „**Großen Deckenversuchsstände**“ wurden aus Holzbalken- und Brettstapel-Elementen erstellt. Ziel der Untersuchungen war es, Eigenfrequenzen  $f$ , Dämpfungen  $D$  und die Schwingbeschleunigungen  $a$  der einzelnen Ausbaukonstruktionen im Zusammenhang mit der subjektiven Bewertung der Decke zu analysieren, um weitere Kriterien für das Empfinden auf den Mensch charakterisieren zu können.

Ursprünglich sollte ebenfalls eine Brettstapel-Beton-Verbund-Konstruktion (Brettstapel, geklebt; Kerven als Verbindungsmittel) im Großen Deckenversuchsstand untersucht werden. Aufgrund der (sehr guten) Ergebnisse der in-situ-Messungen (Decken, die den bekannten Bemessungsregeln entsprechen erzielten auch subjektiv gute bis sehr gute Bewertungen) und der mit 5 m für HBV-Konstruktionen recht geringen Spannweite wurde entschieden, keine HBV-Konstruktion im Deckenversuchsstand einzubauen. Stattdessen wurde die Brettstapeldecke als Einfeldplatte und als Durchlaufplatte über zwei Felder mit Kragarm untersucht.

Aus Kostengründen konnten nicht alle verfügbaren Ausbausysteme (Unterhangdecken und Estrich-Schichten) im „Großen Deckenversuchsstand“ eingebaut und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Biegesteifigkeit und die Dämpfung der Decke experimentell untersucht werden. Wesentliche Eigenschaften, wie die **dynamische Steifigkeit** und die **Biegesteifigkeit von Ausbaukonstruktionen** wurden daher mit weniger aufwändigen Versuchsaufbauten ermittelt und anschließend bewertet.

Um einen Vergleich zwischen Messwerten und Rechenwerten zu ermöglichen, wurden die **Materialeigenschaften** wie z.B. E-Modul und Masse der eingesetzten Konstruktionen ermittelt.

## 6.2 Großer Deckenversuchsstand

### 6.2.1 Allgemeines

In der Versuchshalle der MFPA Leipzig GmbH erfolgte nacheinander der Aufbau von drei ca. 25 m<sup>2</sup> großen Deckenfeldern. Zusätzlich wurden zwei Rohdecken als Durchlaufplatte über zwei Felder mit Kragarm untersucht. Diese „Großen Deckenversuchsstände“ wurden aus Holzbalken- und Brettstapel-Elementen erstellt.

Zur Ermittlung des Einflusses der Aufbauten auf das Schwingungs- und Dämpfungsverhalten wurden die Aufbauten nacheinander aufgebracht und nach jedem Zwischenschritt wurde die Decke angeregt und gemessen. Die Messungen erfolgten am Einzelbauteil (Holzbalken, Brettstapелеlement), an der Rohbaudecke sowie für unterschiedliche Ausbaustufen (schwimmender Nass- und Trockenestrich, Unterhangdecke, Variation des Trittschalldämm-Materials). Zur Ermittlung des Einflusses der Lagerungsbedingungen und des Einflusses der Quersteifigkeit auf die mitschwingende Breite wurden im „Großen Deckenversuchsstand“ die Schwingungsantworten der Decken unter Variation der Deckenbreiten, des Einspanngrades sowie der wahlweisen Halterung des freien Plattenrandes ermittelt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens [Schickhofer et al, 2009] und der Masterarbeit [Fitz, 2008] wurde das Verhalten einer Brettsperrholzdecke unter personeninduzierten Schwingungen durch Messung der Beschleunigungen durch die Autorinnen untersucht. Mit Auswertung der Messwerte wurden die Dämpfungen für zwei Fußbodenaufbauten sowie die Eigenfrequenzen  $f_1$  für unterschiedliche statische Systeme ermittelt. Diese Ergebnisse werden im Folgenden Dank der Zustimmung von Prof. Schickhofer, TU Graz, mit dargestellt.

### 6.2.2 Versuchsstand und zweiseitige Lagerung

Der "Große Deckenversuchsstand" besteht aus zwei Betonstreifenlagern, auf denen die einachsig gespannten Deckenfelder über Stahlrolle und Stahlbleche gelenkig gelagert wurden. Die Spannweite betrug 5 m. Die Auflagerung erfolgte so hoch, dass die Deckenunterseiten zugänglich waren, um Unterhangdecken montieren zu können und um die Decken von unten auslenken zu können ohne die Decke begehen oder anderweitig belasten zu müssen.

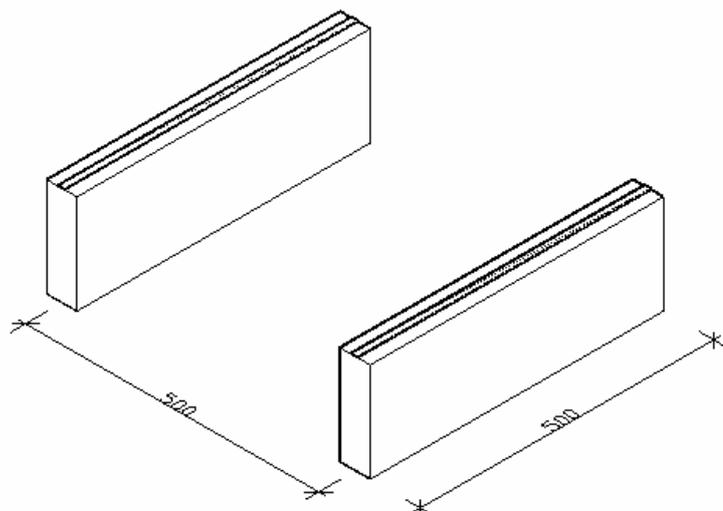


Abbildung 6-1  
Großer Deckenversuchsstand  
für einachsig gespannte  
Deckenfelder

### 6.2.3 Messtechnik

Es wurden zwei unterschiedliche Mess-Systeme verwendet, um die Beschleunigung in Abhängigkeit von der Zeit aufzuzeichnen.

Das System mit drei Sensoren bestand aus folgenden Komponenten (Abbildung 5-1):

- Beschleunigungsaufnehmer MS 2004+ der Fa. SYSCOM mit einem Messbereich bis  $20 \text{ m/s}^2$ ,
- Erschütterungsaufzeichnungssystem MR 2002-CE der Fa. SYSCOM.
- Die Daten wurden mit der Software [WinCom] erfasst und mit der Software [VIEW] (beides Fa. SYSCOM) bzw. [EXCEL] ausgewertet.

Das zweite System mit maximal acht Sensoren bestand aus folgenden Komponenten (Abbildung 6-2):

- Beschleunigungsaufnehmer Typ ARF-20A der Fa. Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltd. Japan mit einem Messbereich bis  $20 \text{ m/s}^2$  und einer Abtastrate von 500 Hz für jeden Sensor,
- Messverstärker (Trägerfrequenzbrückenverstärker) Typ Spider 8, Fa. HBM Messtechnik GmbH Darmstadt, Messbereich  $3 \text{ mV/V}$ .

Die Daten wurden mit der Software DIAdem der Fa. National Instruments erfasst und ausgewertet.



Abbildung 6-2  
Beschleunigungsaufnehmer auf Holz befestigt in  
Aussparung von Unterhangdecke



Abbildung 6-3  
Beschleunigungsaufnehmer auf Nassestrich

#### 6.2.4 Anregung

Um die Messergebnisse der Decken im Labor vergleichbar zu machen, bedarf es einer einheitlichen, messbaren Anregung. Die Anregung nur durch **gehende Personen** wurde als nicht ausreichend genau eingeschätzt, da die Kraft von Person zu Person variiert und von Randbedingungen wie Bodenbelag, Schuhwerk, Frequenz etc. abhängt. Zur besseren Vergleichbarkeit erfolgte die Anregung immer durch die gleiche Person (Frau Richter) mit den gleichen Schuhen. Dabei ging Frau Richter unregelmäßig über das gesamte Deckenfeld. Wenn möglich, erfolgte zusätzlich das Gehen in Resonanz mit der zweiten oder dritten Harmonischen.

Eine weitere einfache Methode ist das Fallenlassen eines **Sandsackes** mit bekanntem Gewicht aus immer der gleichen Höhe (1,5 m bzw. 0,5 m). Die dämpfende Wirkung der ausführenden Person wurde dabei mit gemessen.

Eine etwas aufwändigere Methode ist der Einsatz eines **Schwingungserregers** oder Shakers (Abbildung 6-5). Hier kann die Decke gezielt in der Eigenfrequenz aufgeschaukelt werden. Die gemessene Dämpfung über die Ausschwingkurve nach Abschalten des Shakers ist genauer, vgl. [Petersen, 2000]. Nachteil des Schwingungserregers ist, dass diese Geräte unhandlich sind und nicht mit vertretbarem Aufwand transportiert werden können. Bevorzugt wird deshalb die Methode über die Ausschwingkurve nach Anregung in Resonanz (Shaker) bei den Labormessungen und nach Impulsanregung durch den Sandsack- Wurf oder Heeldrop bei den in-situ- Messungen.

Zusätzlich wurde die Möglichkeit einer definierten Einwirkung gesucht, um die Systemantwort (Schwingbeschleunigung) unterschiedlicher Decken direkt vergleichen zu können.

Dafür wurden die Decken mit einem **Volleyball** (Abbildung 6-4), einem **Sandsack** (5 kg) und durch **Ausklinken einer Masse** (Abbildung 6-6f) angeregt.



Abbildung 6-4  
Anregung durch Ball



Abbildung 6-5  
Anregung durch Shaker

Das Ausklinken einer Masse wurde für unterschiedliche Massen untersucht (25 kg und 50 kg). Die Masse wurde in dem Punkt angebracht, der die Decke in die erste Eigenform auslenkt. Durch einen Bolzenschneider wurde die Lasteintragung plötzlich unterbrochen und die ausgelenkte Decke schwang zurück in die Ausgangslage.



Abbildung 6-6  
Anregung durch Auslenkung mit Masse



Abbildung 6-7  
Anregung durch Auslenkung mit ausgeklinkter Masse

### 6.2.5 Bezeichnungssystematik für Labor-Messungen

Die im Labor untersuchten Decken werden nach folgendem Schema bezeichnet:

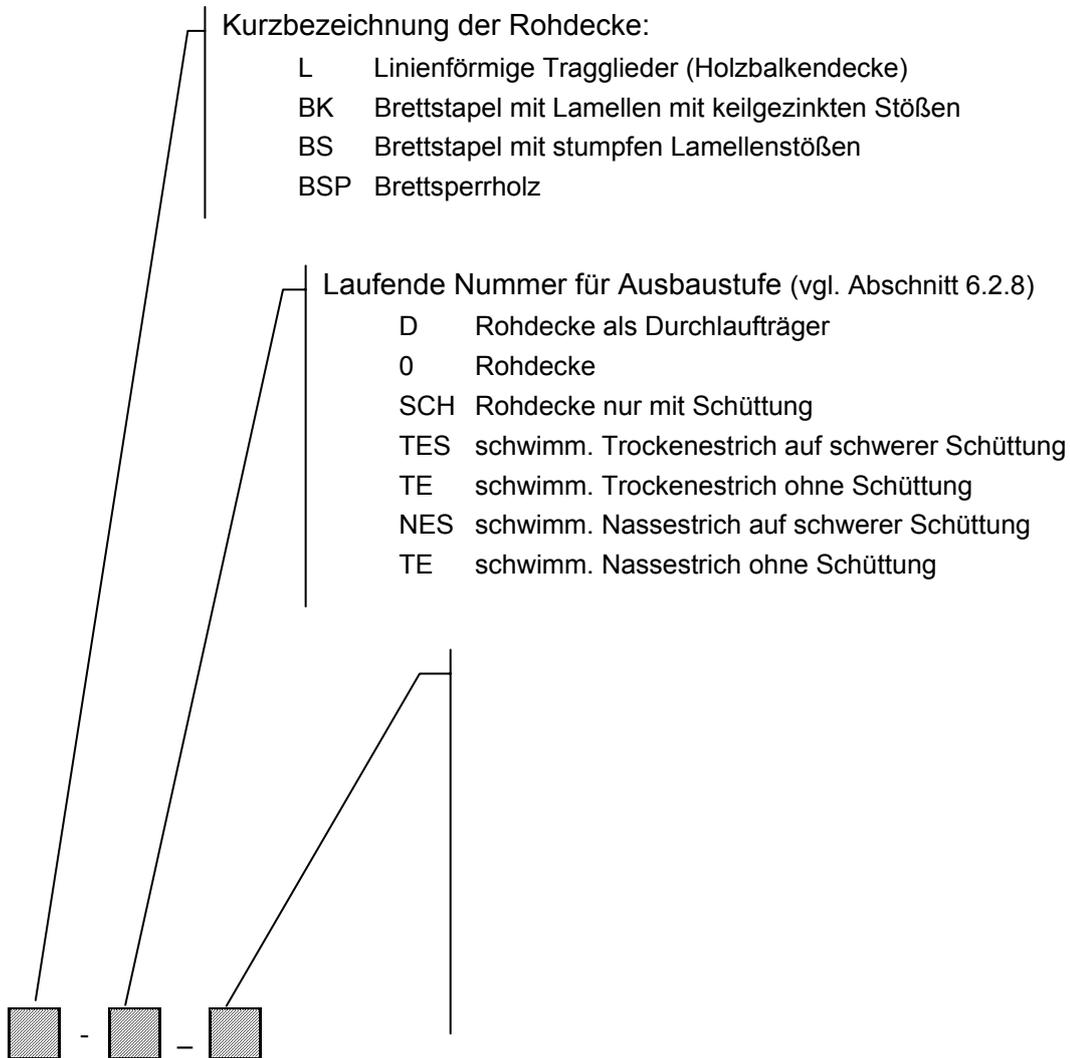


Abbildung 6-8  
Bezeichnungssystematik für Labor-Messungen

### 6.2.6 Versuchskörper

Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über die im "Großen Deckenversuchsstand" untersuchten Decken. Die Flächengewichte wurden durch Wägen ermittelt und in Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Tabelle 6-1 Übersicht über untersuchte Decken

Pos.	Rohdecke	Beschreibung	$m$ [kg/m <sup>2</sup> ]
L	Holzbalkendecke (linienförm. Tragwerk)	Balken b/d = 100/220 mm, e = 400 mm	41,01
BK	Brettstapeldecke mit keilgezinkten Stößen	d = 120 mm, 56 Lamellen mit b = 45 mm	54,00
BS	Brettstapeldecke mit stumpfen Stößen	d = 120 mm, 56 Lamellen mit b = 45 mm	54,00
BSP	Brettsperrholzdecke	d = 155 mm, fünf Schichten je 31 mm	75,60

6.2.6.1 Holzbalkendecke Pos. L

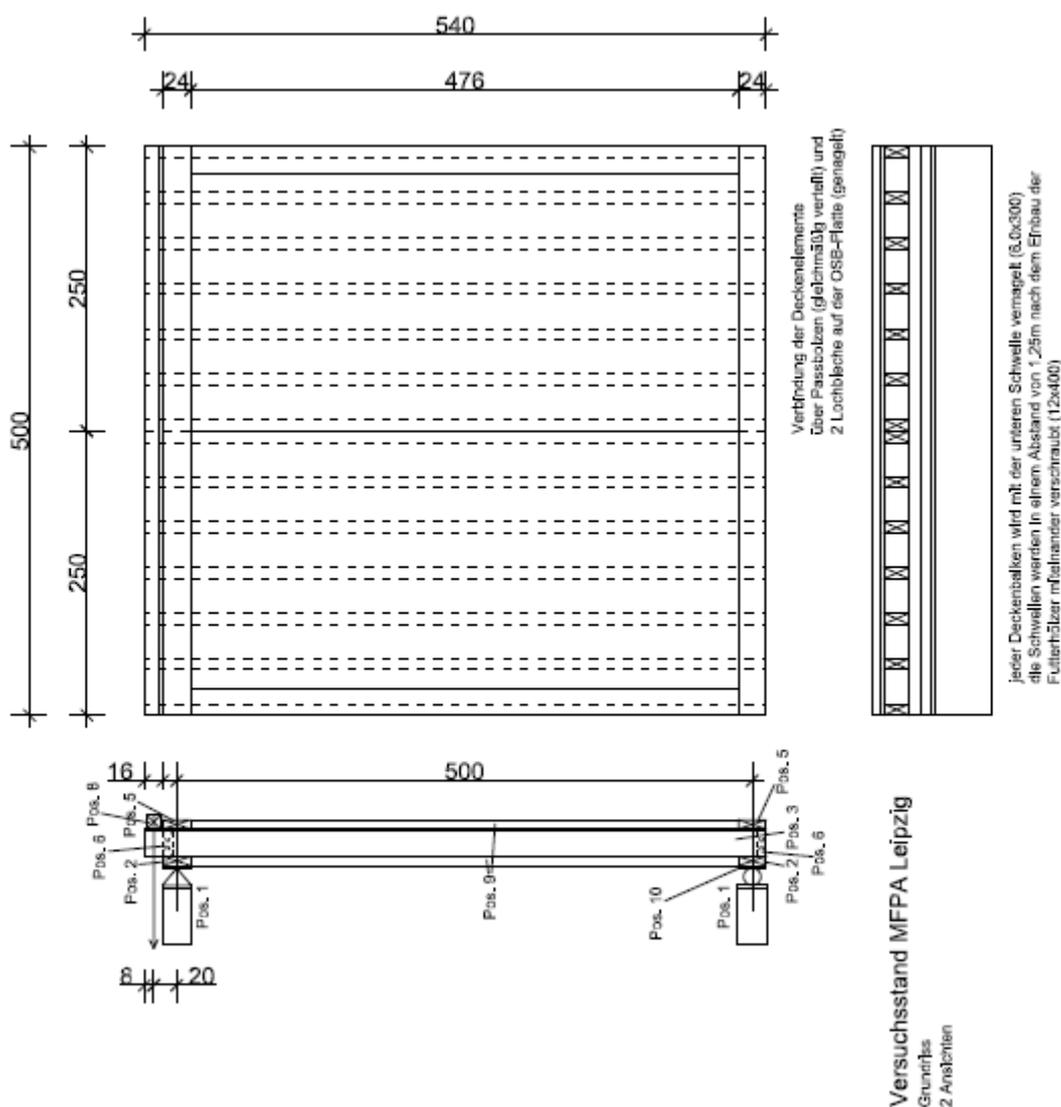


Abbildung 6-9 Holzbalkendecke im Großen Deckenversuchsstand, Zeichnung

Die Holzbalkendecke wurde mit einer sehr hohen Biegesteifigkeit bemessen, so dass sie den bekannten Bemessungsregeln entsprach. Infolgedessen ließ sie sich jedoch nicht durch Gehen oder Laufen in Resonanz bringen.

Abbildung 6-9 zeigt eine Konstruktionszeichnung der Holzbalkendecke:

Jedes Deckenfeld besteht aus sieben Balken und einer aufgeklebten Spanplatte. Die Balken wurden von A bis N nummeriert und es wurde in den Viertelpunkten der Spannweite ein Raster eingeführt, vgl. Zeichnungen im Anhang C .

### 6.2.6.2 Brettstapeldecke

Es wurden zwei Brettstapeldecken gefertigt. Eine Platte bestand aus Lamellen mit keilgezinkten Stößen und die zweite aus Lamellen mit stumpfen Stößen. Beide Platten wurden mit einer sehr niedrigen Eigenfrequenz bemessen, um die unteren Grenzwerte für den Bemessungsvorschlag untersuchen zu können.

Nach einer vergleichenden Messung als Durchlaufplatte (BK-D und BS-D) wurde entschieden, die etwas steifere Brettstapelplatte mit Keilzinkungen für die weiteren Untersuchungen als Einfeldplatte zu verwenden.

Für den Umbau von der Durchlauf- zur Einfeldplatte wurde das Brettstapelelement geteilt. Der Querstoß der **Brettstapeldecke BK-0** wurde über verschraubte seitliche Leisten, die stufenförmig ineinander greifen, realisiert (Abbildung 6-11).



Abbildung 6-10  
Brettstapelelement mit stumpfen Stößen der  
Lamellen, BS-D im Versuchsstand



Abbildung 6-11  
Stoßausbildung zwischen den beiden  
Deckenelementen der Brettstapeldecke

### 6.2.6.3 Brettsperrholzplatte

In [Schickhofer et al, 2009] und [Fitz, 2008] wurde der Versuchskörper aus Brettsperrholz ausführlich beschrieben, so dass hier nur eine kurze Vorstellung erfolgt. Die Platte bestand aus fünf Schichten:

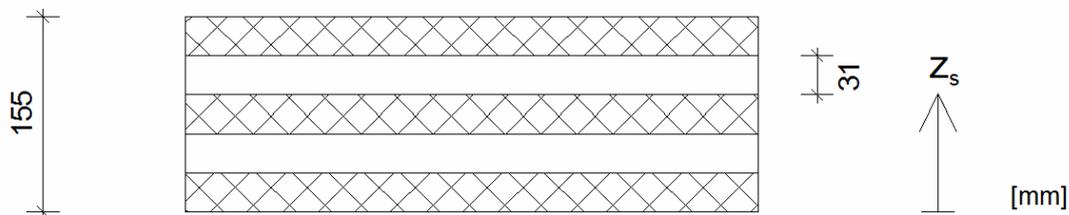


Abbildung 6-12 Querschnitt Brettsperrholzplatte

Die Stoßausbildung der **BSP-Decke** kann [Hamm / Richter - BSP 2009] bzw. [Richter, 2008] entnommen werden.

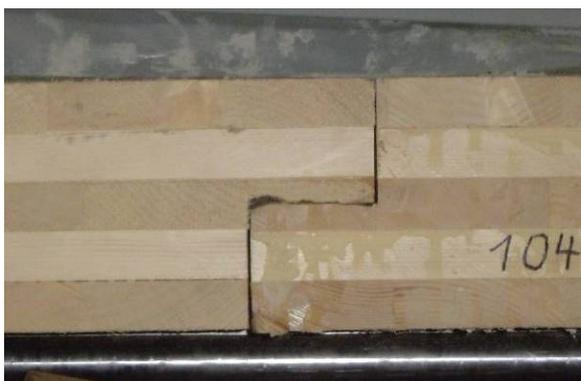


Abbildung 6-13  
Brettsperrholzelement mit Querkraft-Stoß



Abbildung 6-14  
Brettsperrholzelement mit Momenten-Stoß

### 6.2.7 Versuchsprogramm

Variiert wurden die Auflagerungen / Statischen Systeme wie folgt:

- Einfeld 5,0 m x 5,40 m (L, BS, BK und BSP) ,
- Durchlaufträger über zwei Felder mit Kragarm 10,80 m x 2,50 m (BS und BK)
- Durchlaufträger über zwei Felder mit Kragarm 11,00 m x 3,00 m (BSP)
- Lagerung zweiseitig und vierseitig
- Gelenkige Lagerung oder einseitige elastische Randeinspannung
- Lagerung auf Stahl, Holzschwellen oder Elastomer

Zur Ermittlung des Einflusses von Ausbaukonstruktionen wurden die folgenden Schichten miteinander kombiniert:

- Estrich: Trockenestrich (TE) und Nassestrich (NE)
- Schüttung aus Splitt (TES oder NES)
- Trittschalldämmung
- Nuttschicht (Teppich)

Um die Untersuchungsergebnisse besser miteinander vergleichen zu können, wurden vier Typen von Fußbodenaufbauten auf die Positionen L, BK und BSP aufgebracht, die unterschiedliche Schallschutzanforderungen erfüllen.

- TE schwimmend gelagerter Trockenestrich
- TES schwimmend gelagerter Trockenestrich auf schwerer Schüttung
- NE schwimmend gelagerter Nassestrich
- NES schwimmend gelagerter Nassestrich auf schwerer Schüttung

Der Einfluss einer Unterhangdecke wurde auf Lattung (UL) und mit Federschienen (UF) an der Holzbalkendecke (L) untersucht.

### 6.2.8 Lagerungsvarianten und Statische Systeme

Die Lagerung der Holzdecken wurde variiert. Tabelle 6-2 gibt einen Überblick über alle im Labor untersuchten Lagerungsvarianten.

Tabelle 6-2 Übersicht über untersuchte Lagerungsvarianten

Pos.	Rohdecke	DLT	Zweiseitig	Vierseitig	Randein- spannung	Holz	Elastomer
L	Holzbalkendecke	-	X	X	X		X
BK	Brettstapeldecke mit keilgezinkten Stößen	X	X	X	-		X
BS	Brettstapeldecke mit stumpfen Stößen	X	-	-	-		-
BSP	Brettsperrholzdecke	X	X	X	-		-

#### 6.2.8.1 Zweiseitige Lagerung

Abbildung 6-1 zeigt die Betonstreifen für die einachsige Lagerung, Abbildung 6-15 zeigt das zugehörige Auflagerdetail. Variiert wurde die Auflagerung auf zusätzlicher Holzschwelle, ggf. in Kombination mit einem Elastomerstreifen.

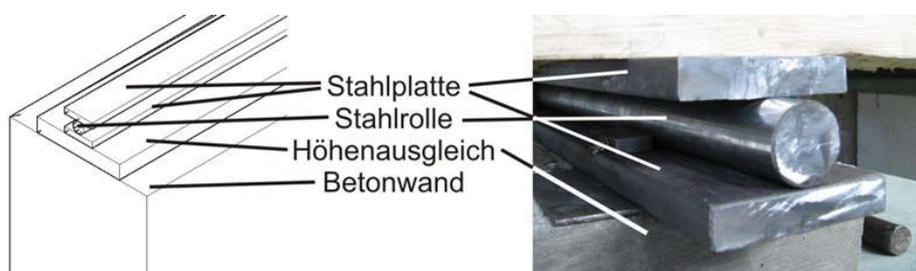


Abbildung 6-15  
Großer  
Deckenversuchsstand -  
Auflagerdetail lose  
Rolle



Abbildung 6-16 Großer  
Deckenversuchsstand, Auflagerdetail feste Rolle

### 6.2.8.2 Vierseitige Lagerung

Zur Herstellung einer vierseitigen Lagerung wurden Holzständerwände hergestellt, die seitlich unter den freien Rändern der Decke angeordnet wurden (Abbildung 6-17). Diese wurden in Rahmenbauweise gefertigt und beidseitig mit 22 mm starken OSB – Platten beplankt.



Abbildung 6-17 Großer Deckenversuchsstand, vierseitige Lagerung

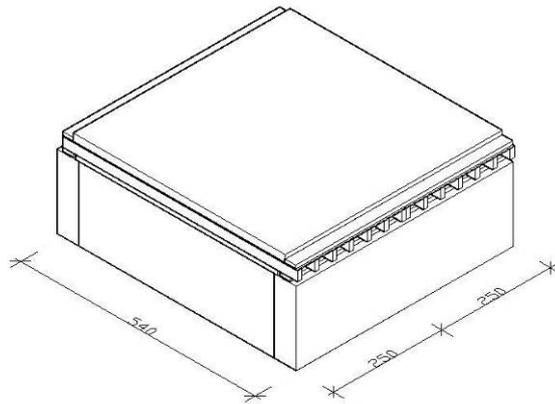


Abbildung 6-18 Großer Deckenversuchsstand, vierseitige Lagerung, Isometrie

Durch den Vergleich der Messergebnisse konnten Rückschlüsse auf den Einfluss der zweiachsigen Tragwirkung auf das Schwingungsverhalten gezogen werden. Allerdings gelang es nicht immer, die zweiachsige Tragwirkung so herzustellen, dass die Holzdecken auf allen vier Auflagern gleichmäßig auflag. Vor allem die (im Verhältnis zu ihrer geringen Masse eher) biegesteife Holzbalkendecke in Kombination mit leichten Fußbodenaufbauten ohne Schüttung lag trotz Unterfütterungen nicht immer gleichmäßig auf. Die hier gemessenen Werte sind infolgedessen auch nicht immer in sich stimmig. So wurden z. T. geringere Eigenfrequenzen bei vierseitiger Lagerung gemessen.

### 6.2.8.3 D - Rohdecken als Durchlaufträgersystem

Für eine Auswahl der untersuchten Rohkonstruktionen wurde über den beantragten Umfang der Untersuchungen hinaus die Durchlaufwirkung untersucht. Dafür wurden die Holzdeckenelemente als Durchlaufplatten über zwei Felder mit Kragarm in den erweiterten Versuchsstand eingebaut und erst nach dieser Messung zertrennt und zu einer Einfeldplatte, wie oben beschrieben, zusammengefügt.

Die Brettstapeldecke BK-0, bestehend aus Lamellen mit keilgezinkten Stößen und die Brettstapeldecke BS-0, bestehend aus Lamellen mit stumpfen Stößen wurden mit einer Länge von 10,80 m, die Brettsperrholzplatte BSP 0 mit einer Länge von 11,00 m eingebaut.

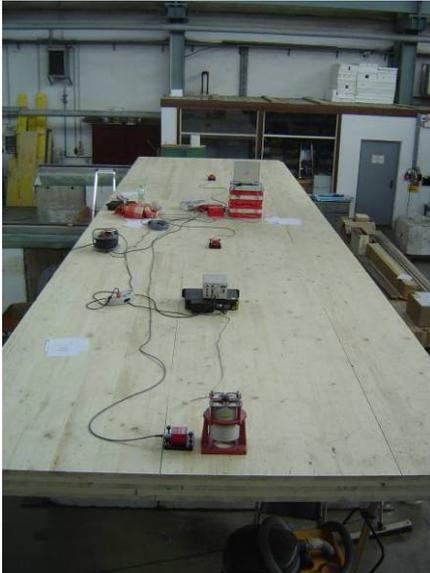


Abbildung 6-19 BSP-0  
Durchlaufplatte

#### 6.2.8.4 Randeinspannung

Zur Untersuchung des Einflusses einer elastischen Randeinspannung wurde die Holzbalkendecke L mit unterschiedlichen Überständen an den Auflagern in den Versuchsstand eingebaut, vgl. Abbildung 6-20 bis Abbildung 6-22. Abbildung 6-23 zeigt die Detailausbildung der Randeinspannung. Als Auflasten wurden im Holzhausbau übliche Linienlasten in den Laststufen 0 kN; 20,4 kN/m und 36 kN/m) aufgebracht.



Abbildung 6-20 Großer Deckenversuchsstand,  
Randeinspannung



Abbildung 6-21 Großer Deckenversuchsstand,  
Randeinspannung von oben

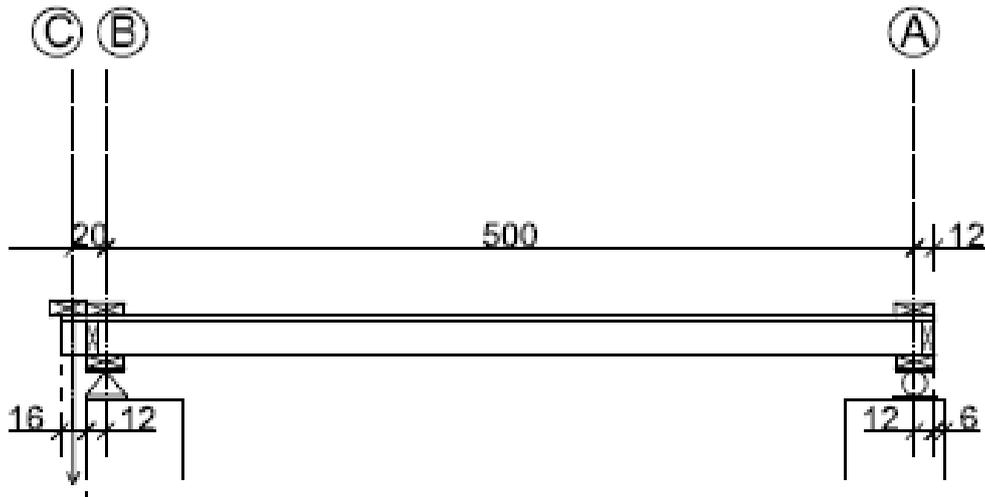


Abbildung 6-22  
Großer Deckenversuchsstand, Zeichnung Randeinspannung

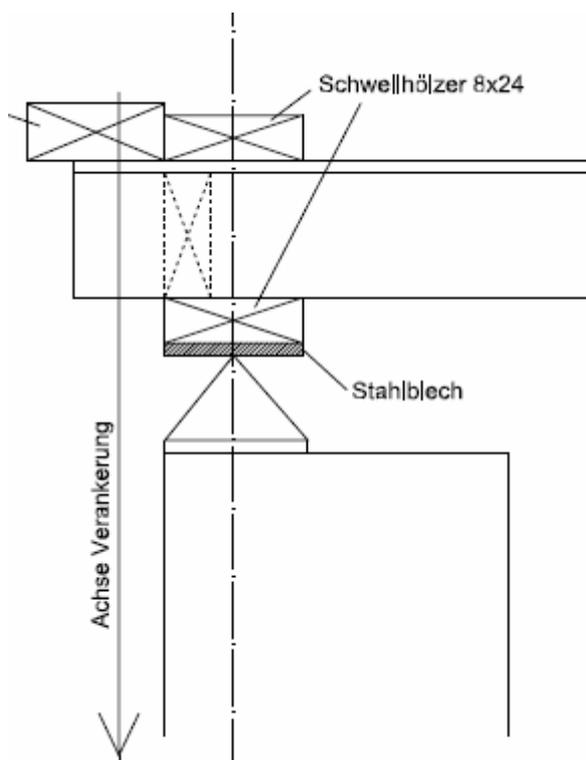


Abbildung 6-23  
Großer Deckenversuchsstand, Zeichnung Detail Randeinspannung

### 6.2.9 Ausbauvarianten

In den folgenden Abschnitten werden die untersuchten Ausbaustufen beschrieben. Die Protokolle der Messungen einschließlich der ausführlichen Bewertungen sind in Anhang C zusammengestellt.

Tabelle 6-3 gibt einen Überblick über alle im Labor untersuchten Deckenkonstruktionen.

Tabelle 6-3 Übersicht über untersuchte Ausbaukonstruktionen

Pos.	Rohdecke	D DLT	0 Rohdecke	TE	TES	NE	NES	SCH nur Schüttung
L	Holzbalkendecke	-	X	X	X und UL, UF	X	X und UL	X
BK	Brettstapeldecke mit keilgezinkten Stößen	X	X	X	X	X	X	-
BS	Brettstapeldecke mit stumpfen Stößen	X	-	-	-	-	-	-
BSP	Brettsperrholzdecke	X	X	-	X	-	X	-

#### 6.2.9.1 Material

Die Ergebnisse der Versuche am Deckenstreifen (Abschnitt 6.3) und am Großen Deckenversuchsstand sollen untereinander verglichen werden, so dass gleiche Materialien für die Aufbauten verwendet werden sollten. Es war leider aus technischen Gründen nicht möglich, beide Estrichplatten aus einer Lieferung zu betonieren. Auch die Wiederverwendung der Nassestrich-Schicht im Großen Deckenversuchsstand scheiterte trotz eingebauter Transportösen und Bewehrung. Weitere Abweichungen bzw. Änderungen der Ausbauschichten ergaben sich im Laufe der Auswertungen der Zwischenergebnisse aus in-situ- und Labor-Messungen bzw. infolge von Entscheidungen der Projekttreffen. Tabelle 6-4 enthält alle verwendeten Materialien.

Nach dem Ausbau wurden die einzelnen Komponenten gewogen und die Masse den weiteren Vergleichsrechnungen zugrunde gelegt.

Um die Fußbodenaufbauten auf der Rohdecke einbauen zu können, wurden die Ränder mit einer Schalung versehen (Abbildung 6-24 und Abbildung 6-25). Der Einfluss dieser Randschalung auf das Schwingungsverhalten wurde durch separate Messungen erfasst.

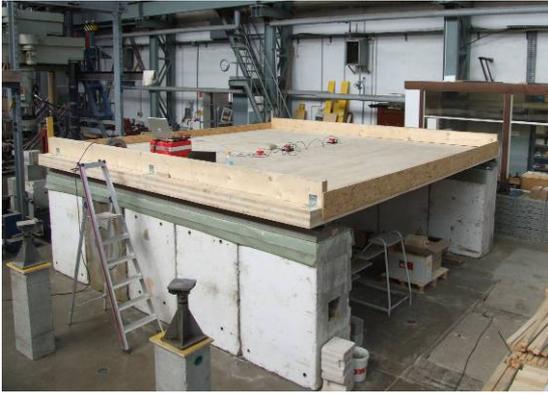


Abbildung 6-24 Großer Deckenversuchsstand, Randschalung für Fußbodenaufbauten



Abbildung 6-25 Großer Deckenversuchsstand, Randschalung für Fußbodenaufbauten, Detail

Tabelle 6-4 Übersicht über verwendete Materialien (Fußbodenaufbauten)

Bezeichnung	Material	Eigenschaften	Quelle
Trockenestrich	OSB/3	Dicke $d = 22 \text{ mm}$ $E_{L\ddot{a}ngs} = 3.500 \text{ N/mm}^2$ $E_{Quer} = 1.400 \text{ N/mm}^2$	[DIN EN 300]
Trockenestrich	Fermacell	Dicke $d = 25 \text{ mm}$ $E = 1.000 \text{ N/mm}^2$	eigene Versuche
Nassestrich	Anhydrit-Fließestrich CA-C20-F4	Konsistenz F6 $E = 14.000 \text{ N/mm}^2$	Lieferschein und eigene Versuche
Nassestrich	Zementestrich	$E = 25.000 \text{ N/mm}^2$ $\beta_w = 34 \text{ N/mm}^2$	[DIN 1048-5]
Dämmung	Trittschalldämmung Heralan TPE 30-2	Dicke 30 mm bei 2 mm Eindrückbarkeit Dynamische Steifigkeit $s' \leq 25 \text{ MN/m}^3$	Herstellerangaben und [DIN EN 13162]
Schüttung	Splitt 2/8 ungebunden	Körnung 2 - 8 mm $E = 50 \text{ N/mm}^2$	Annahme
Unterhangdecke	Gipskartonplatte GK	Dicke $d = 12,5 \text{ mm}$ $E = 1.000 \text{ N/mm}^2$	[DIN 18180]

### 6.2.9.2 0 - Rohdecken

Die beiden 2,5 m x 5,4 m großen Deckenfelder der **Holzbalkendecke L-0** wurden im Versuchsstand eingebaut und über Bolzen und Lochbleche miteinander verbunden. Im Versuchsstand wurde die Decke wahlweise auf Holzschwellen bzw. Elastomerstreifen oder nur den Stahlrollen gelagert. In weiteren Schritten wurden an den Auflagerseiten zwischen den Holzbalken Futterhölzer sowie Schwellhölzer über den Auflagern montiert.

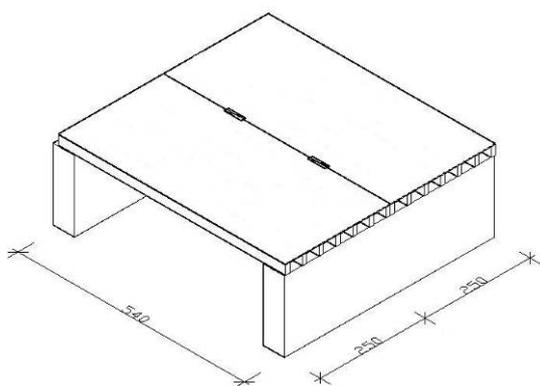


Abbildung 6-26 L-0  
Holzbalkendecke als Rohdecke im Großen  
Deckenversuchsstand

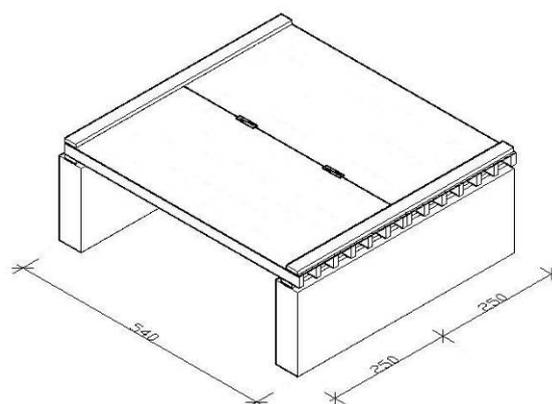


Abbildung 6-27 L-0  
Holzbalkendecke als Rohdecke mit Schwellhölzern  
im Großen Deckenversuchsstand

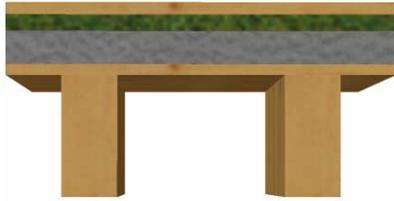
### 6.2.9.3 SCH - Splittschüttung auf Holzbalken-Rohdecke L-SCH

Zur Ermittlung des Einflusses der Splittschüttung auf das Schwingungsverhalten wurden eine seitliche Randschalung und eine 6 cm dicke Splittschicht auf die Holzbalken-Rohdecke eingebracht. Beim Ausbau wurde der Splitt gewogen und bei der Berechnung der Deckenmasse berücksichtigt.

Mit diesem Aufbau konnte auf einfache Weise das FEM-Modell für die Rohdecke einschließlich einer zusätzlichen Masse kontrolliert werden.

### 6.2.9.4 TES - Schwimmender Trockenestrich auf Schüttung (L-TES, BK-TES und BSP-TES)

Für diesen Versuchsaufbau wurde ein schwimmender Trockenestrich mit schwerer Schüttung auf die **Holzbalken und Brettstapel-Rohdecke** eingebaut. Nach dem ersten Einbau von OSB-Platten als Trockenestrich wurde entschieden, für alle weiteren Untersuchungen Gips-Trockenestrich-Elemente einzusetzen. Der Aufbau setzt sich zusammen aus:



- 22 mm OSB (als Scheibe ausgeführt) oder 25 mm Trockenestrich (Fermacell-Estrichelemente)
- 30 mm Trittschalldämmung (Heraklith TPE 30-2)
- 60 mm Splitt 2/8

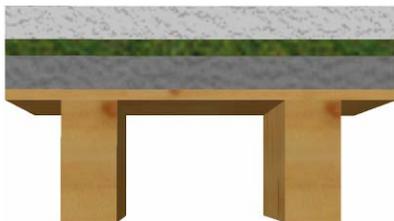
Abbildung 6-28: Querschnitt Versuchsaufbau TES

Die Ausbildung auf der **BSP-Decke** kann [Hamm / Richter - BSP 2009] entnommen werden:

- 25 mm Trockenestrich (Fermacell-Estrichelemente)
- 30 mm Trittschalldämmung (Heraklith TPE 30-2)
- 50 mm Splitt ungebunden (2/8)
- 2 x 8 mm Holzweichfaserplatte.

#### 6.2.9.5 NES - Schwimmender Nassestrich auf Schüttung (L-TES, BK-TES und BSP-TES)

Der Trockenestrich wurde entfernt und durch einen Nassestrich ersetzt. Es handelt sich hierbei um einen Anhydrit- Fließestrich, der beim Innenausbau auf Grund des einfachen und schnellen Einbaus häufig zur Anwendung kommt. Es entstand daher folgender Fußbodenaufbau:



- 60 mm Anhydrit – Fließestrich
- 0,2 mm PE-Folie
- 30 mm Trittschalldämmung (Heraklith TPE 30-2)
- 60 mm Splitt 2/8

Abbildung 6-29: Querschnitt Versuchsaufbau NES

Die Ausbildung auf der **BSP-Decke** kann [Hamm / Richter - BSP 2009] entnommen werden:

- 55 mm Zementestrich
- 0,2 mm PE-Folie
- 30 mm Trittschalldämmung (Heraklith TPE 30-2)
- 50 mm Splitt ungebunden (2/8) auf Trennvlies als Rieselschutz

#### **6.2.9.6 NE - Schwimmender Nassestrich ohne Schüttung (L-NE und BK-NE)**

Auf Hinweis des projektbegleitenden Ausschusses wurde eine in der Holzbaupraxis häufig eingesetzte Ausbaukombination mit schwimmendem Nassestrich ohne Schüttung in das Versuchsprogramm wie folgt aufgenommen:

- 60 mm Anhydrit – Fließestrich
- 0,2 mm PE-Folie
- 30 mm Trittschalldämmung (Heraklith TPE 30-2)

#### **6.2.9.7 TE - Schwimmender Nassestrich ohne Schüttung (L-NE und BK-NE)**

Ebenfalls auf Hinweis des projektbegleitenden Ausschusses wurde eine Ausbaukombination mit schwimmendem Trockenestrich ohne Schüttung in das Versuchsprogramm wie folgt aufgenommen:

- 25 mm Trockenestrich (Fermacell-Estrichelemente)
- 30 mm Trittschalldämmung (Heraklith TPE 30-2)

#### **6.2.9.8 UF - Unterhangdecke an Federschienen (UF)**

An die Unterseite der Holzbalkendecke mit einem schwimmenden Trocken- oder Nassestrich, ggf. auf Schüttung, wurde eine Unterhangdecke aus Gipskartonplatten an Federschienen befestigt. Dieses System wird häufig verwendet, wenn Schallschutzaspekte im Ausbau eine Rolle spielen und wurde daher in das Versuchsprogramm aufgenommen.

#### **6.2.9.9 UL - Holzbalkendecke mit schwimmendem Trockenestrich auf Schüttung und Unterhangdecke auf Lattung (UL)**

An die Unterseite der Holzbalkendecke mit einem schwimmenden Trocken- oder Nassestrich, ggf. auf Schüttung wurde eine Unterhangdecke aus Gipskartonplatten auf Lattung befestigt. Diese Variante wird bei Decken mit nur geringen Schallschutzanforderungen angewendet.

#### **6.2.9.10 Teppich**

In einigen Versuchen wurde ein handelsüblicher Teppich auf dem Estrich ausgelegt. Besonderes Augenmerk lag hierbei nicht auf den Eigenfrequenzen, sondern auf der Dämpfung und der Schwingbeschleunigung.

### **6.2.10 Ergebnisse / Messwerte**

Die im Versuchsstand ermittelten Bewertungen, Eigenfrequenzen und Dämpfungen der ersten Eigenfrequenz zeigt Tabelle 6-5 für die untersuchte Holzbalkendecke Pos. L.

Tabelle 6-6 zeigt die Ergebnisse für die Brettstapeldecken.

Die mit einem “-“ gekennzeichneten Felder konnten nicht ausgewertet werden bzw. wurden nicht ausgewertet, da der untersuchte Umfang wesentlich größer als ursprünglich geplant war und nicht alle Werte für alle Messungen ausgewertet werden konnten. Alle dargestellten Werte wurden aus mindestens drei Einzelwerten arithmetisch gemittelt.

Eine ausführliche Darstellung befindet sich im Anhang B .

Tabelle 6-5 Bewertung, Eigenfrequenzen und Dämpfung der ersten Eigenfrequenz

Bezeichnung	Beschreibung	Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	Bewer- tung	D1 [%]	Gemessene Eigenfrequenzen							
					f1 [Hz]	f2 [Hz]	f3 [Hz]	f4 [Hz]	f5 [Hz]	f6 [Hz]	f7 [Hz]	f8 [Hz]
L-0_Elast	Rohdecke auf Elastomertager	41,01	3,0	4,52	14,85	18,50	-	28,75	37,15	-	41,60	53,40
L-0_Elast+Holz	Rohdecke mit unteren Schwellhölzern auf Elastomertager	41,01	-	-	17,50	-	-	-	-	-	-	-
L-0_Holz1	Rohdecke mit unteren Schwellhölzern auf Rollenlager	41,01	-	-	18,40	-	-	-	-	-	-	-
L-0_Holz2	Rohdecke mit Schwellhölzern oben und unten auf Rollenlager	41,01	4,0	3,59	15,00	18,45	20,60	27,50	33,90	41,35	45,90	54,70
L-SCH	wie VA mit 6cm Splitt	122,33	-	-	10,40	11,30	13,65	17,05	21,15	25,13	28,41	33,75
L-TES	leichter Deckenaufbau 2-seitig	139,73	2,0	2,99	10,30	11,15	13,40	17,15	21,10	26,10	30,25	36,00
L-TES_4seitig	leichter Deckenaufbau 4-seitig	139,73	2,0	3,47	10,15	15,10	18,45	21,55	27,55	28,21	32,90	39,40
L-TES_UF	leichter Deckenaufbau 2-seitig mit Unterhangdecke an Federschielen	151,41	2,0	3,16	9,75	11,17	13,95	16,28	22,10	27,20	29,95	35,84
L-TES_UL	leichter Deckenaufbau 2-seitig mit Unterhangdecke an Sparschalung	150,93	2,0	2,15	10,35	11,52	15,10	19,63	24,55	31,43	36,16	42,75
L-TES_UL_Teppich	wie VA 9 mit Teppichauflage	153,93	2,0	2,39	10,30	11,46	15,40	19,70	24,50	30,25	36,14	42,10
L-NES_UL	schwerer Aufbau 2-seitig mit Unterhangdecke an Sparschalung	278,45	1,0	2,85	9,75	10,95	16,35	20,45	23,30	26,20	30,70	39,50
L-NES	wie VA 11 ohne Unterhangdecke	267,25	1,2	2,91	9,55	10,47	14,50	17,57	20,03	24,00	30,17	36,12
L-NES_Teppich	wie VA 12 mit Teppichauflage	270,25	1,0	3,16	9,62	10,44	14,55	17,87	19,94	23,95	30,67	36,29
L-NES_4seitig	schwerer Aufbau 4-seitig	267,25	1,0	4,57	10,35	-	15,10	21,45	28,35	36,87	40,20	-
L-NES_Randeinsp_0	Randeinspannung schwerer Aufbau, ohne Last, 2-seitig	267,25	1,0	5,38	9,70	-	14,90	-	-	24,95	-	36,15
L-NES_Randeinsp_36	Randeinspannung schwerer Aufbau, 2-seitig, Last=36kN/m	267,25	2,0	3,09	11,80	19,65	22,42	27,75	35,80	-	45,10	-
L-0_Randeinsp_0	Randeinspannung Rohdecke, ohne Last, 2-seitig	41,01	-	4,22	15,90	-	-	-	-	-	-	-
L-0_Randeinsp_20,4	Randeinspannung Rohdecke, 2-seitig, Last=20,4kN/m	41,01	-	5,53	9,70	-	-	-	-	-	-	-
L-NE_4seitig_Holz	Anhydrit-NE auf TSD 4-seitig, Holzschwelle	173,53	1,5	-	11,80	-	-	-	-	-	-	-
L-NE_Holz	Anhydrit-NE auf TSD 2-seitig, Holzschwelle	173,53	1,5	-	10,95	-	-	-	-	-	-	-
L-NE_Holz	Anhydrit-NE auf TSD 2-seitig, Holzschwelle, Elastomer	173,53	1,5	-	11,30	-	-	-	-	-	-	-
L-TE_4seitig_Holz+Elast	TE auf TSD 4-seitig, Holzschwelle + Elastomer	58,41	2,5	-	13,05	-	-	-	-	-	-	-
L-TE_Holz+Elast	TE auf TSD 2-seitig, Holzschwelle + Elastomer	58,41	2,5	-	13,75	-	-	-	-	-	-	-
L-TE_Holz	TE auf TSD 2-seitig, Holzschwelle	58,41	2,6	-	13,70	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 6-6 Bewertung (auch in Worten), Eigenfrequenz und Massen der untersuchten Decken

Bezeichnung	Beschreibung	Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	Bewertung	f1 [Hz]	Bewertung in Worten
BK-D	Rohdecke DLT	54,00	4,0	14,85	Schwingungen deutlich spürbar, nicht akzeptabel
BK-D_Elast	Rohdecke DLT auf Elastomer	54,00	0,0	17,50	Schwingungen durch Elastomer etwas geringer aber immer noch deutlich spürbar, nicht akzeptabel
BS-D	Rohdecke DLT	54,00	4,0	18,40	Schwingungen deutlich spürbar, nicht akzeptabel
BK-0	Rohdecke	54,00	4,0	15,00	Schwingungen deutlich spürbar, nicht akzeptabel
BK-NES	Anhydrit-NE auf TSD und 6cm Schüttung, zweiseitig	272,17	2,5 bis 1	10,40	Schwingungen nicht spürbar bei Gehen allein, sehr angenehm Schw. Spürbar bei fremdem Gehen, jedoch akzeptabel
BK-NES_4seitig	Anhydrit-NE auf TSD und 6cm Schüttung, vierseitig	272,17	2,5 bis 1	10,30	Schwingungen nicht spürbar bei Gehen allein, sehr angenehm Schw. Spürbar bei fremdem Gehen, jedoch akzeptabel
BK-NES_Holz	Anhydrit-NE auf TSD und 6cm Schüttung, zweiseitig, auf Holzschwelle	272,17	0,0	10,15	Schwingungen nicht spürbar bei Gehen allein, sehr angenehm Schw. Spürbar bei fremdem Gehen, jedoch akzeptabel
BK-NES_Elast	Anhydrit-NE auf TSD und 6cm Schüttung, zweiseitig, auf Elastomer	272,17	0,0	9,75	eigenes und fremdes normales Gehen nicht spürbar, Ball nicht spürbar, Heeldrop und betontes Gehen nur von Fremden spürbar
BK-TE_S_Elast+Holz	TE auf TSD und Schüttung, zweiseitig, auf Holz und Elastomer	167,13	2,5	10,35	eigenes normales Gehen nicht spürbar, Ball unangenehm spürbar, eig. Heeldrop, Springen und betontes Gehen stark spürbar, Sandsack sehr unangenehm
BK-TE_S_4seitig_Elast+Holz	TE auf TSD und Schüttung, vierseitig, auf Holz und Elastomer	167,13	2 bis 3	10,30	eigenes normales Gehen gering spürbar, fremdes normales Gehen spürbar und unangenehm eigenes betontes Gehen spürbar, eig. Heeldrop, Sprung und Ball und Sandsack spürbar und unangenehm
BK-TE_S_ohne Randsch_Elast+Holz	TE auf TSD und Schüttung, zweiseitig, auf Holz und Elastomer, (ohne Randschalung)	167,13	0,0	9,75	Schwingungen spürbar und unangenehm, langes Nachschwingen
BK-TE_S_Elast+Holz	TE auf TSD, zweiseitig, auf Elastomer und Holzschwelle	80,84	3 bis 4	9,55	Schwingungen spürbar und unangenehm, langes Nachschwingen
BK-TE_S_4seitig_Elast+Holz	TE auf TSD, vierseitig, auf Elastomer und Holzschwelle	80,84	3 bis 4	10,35	Schwingungen spürbar und unangenehm, langes Nachschwingen
BK-NE_4seitig_Holz+Elast	Anhydrit-NE auf TSD 4-seitig, Holzschwelle + Elastomer	185,87	1,4	9,70	klingt sehr schnell ab, nicht spürbar: eigenes normales und betontes Gehen, Sandsack aus 0,50 m Höhe eigener Heeldrop und Ball Spürbar jedoch nicht unangenehm: fremdes Gehen, Sandsack aus 1,50 m Höhe, eigener Sprung und fremder Heeldrop
BK-NE_Holz+Elast	Anhydrit-NE auf TSD 2-seitig, Holzschwelle + Elastomer	185,87	1,8	11,80	spürbar, jedoch nicht unangenehm: eigenes normales und betontes Gehen, eigener Sprung und Heeldrop Spürbar und unangenehm: fremdes Gehen, Sandsack aus 1,50 m Höhe, eigener Sprung und fremder Heeldrop

## 6.3 Biegesteifigkeit von Ausbaukonstruktionen

### 6.3.1 Allgemeines

Eine mögliche Ursache der Differenz zwischen gemessener und berechneter Eigenfrequenz ist die zusätzliche Steifigkeit der Ausbaukonstruktionen. Um diesen Einfluss quantifizieren zu können, wurden an einem Deckenstreifen mit variablen Aufbauten Drei- und Vier-Punkt-Biegeversuche durchgeführt und Kraft, Verformungen und Dehnungen gemessen. Abbildung 6-30 zeigt ein Foto, Abbildung 6-31 den schematischen Aufbau.

Dafür wurden alle Aufbauten, die auch am Großen Deckenversuchsstand eingebaut waren, auf einem 450 mm breiten Deckenstreifen als Deckenausschnitt eingebaut und einer Belastungsprüfung unterzogen, um die effektive Biegesteifigkeit des Gesamtquerschnitts zu ermitteln. Die Versuche wurden in Anlehnung an [DIN EN 408] durchgeführt. Ziel der Versuche war, den E-Modul der Materialien und einen Faktor  $\gamma$  für den Verbundgrad zu ermitteln.

### 6.3.2 Versuchsstand

Der Drei-Punkt-Biegeversuch zur Ermittlung des effektiven globalen E-Moduls wurde mit einer Spannweite von 1,50m durchgeführt. Der Vier-Punkt-Biegeversuch zur Ermittlung des effektiven globalen E-Moduls wurde mit 5,0m Spannweite durchgeführt. Die Kraft wurde so gewählt, dass die Verformungen im linear-elastischen Bereich blieben.



Abbildung 6-30 Biegeversuch

Aus den Messwerten wurden der Spannungsverlauf über die Querschnittshöhe sowie der scheinbare E-Modul und der scheinbare Schubmodul bestimmt. In der Auswertung wurde ein Verbundgrad  $\gamma$  auf der Basis des  $\gamma$ -Verfahrens, vgl. [DIN 1052] ermittelt. Aus der Kombination der einzelnen Versuche wurden die Verbundgrade für die einzelnen Schichten ermittelt.

Die Auflagerung der Versuchskörper erfolgte ideal gelenkig über Rolle und Prisma aus Stahl auf Betonblöcken.

### 6.3.3 Messtechnik

Um die Verformungen der Konstruktion zu erfassen, wurde die in Tabelle 6-7 aufgeführte Messtechnik verwendet. Die Anordnung der Aufnehmer kann Abbildung 6-31ff entnommen werden.

Tabelle 6-7 Messtechnik

Nr.	Bezeichnung	Messgröße	Lage vom unteren Holzrand z [mm]	Messgerät	Maximalwert	Linearitätsabweichung
0	F	Kraft		Kraftmessdose	400 kN	0,50 %
1	w <sub>1</sub>	Durchbiegung in Feldmitte	0	Seilzug-aufnehmer	500 mm	0,20 %
2	w <sub>2</sub>	Durchbiegung über				
3	w <sub>3</sub>	Messbereich				
4	w <sub>4</sub>	relativ Verschiebung Estrich-Holz		Induktiver Weg-aufnehmer, Messbasislänge ca. 200 mm (genaue Werte siehe Anlage 1)	10 mm	0,20 %
5	w <sub>5</sub>					
6	w <sub>6</sub>	Dehnung Holz Unterkante	9,12		2 mm	0,20 %
7	w <sub>7</sub>	Dehnung Holz Oberkante	148,56			
8	w <sub>8</sub>	Dehnung Estrich Unterkante	255,95			
9	w <sub>9</sub>	Dehnung Estrich Oberkante	290,06			

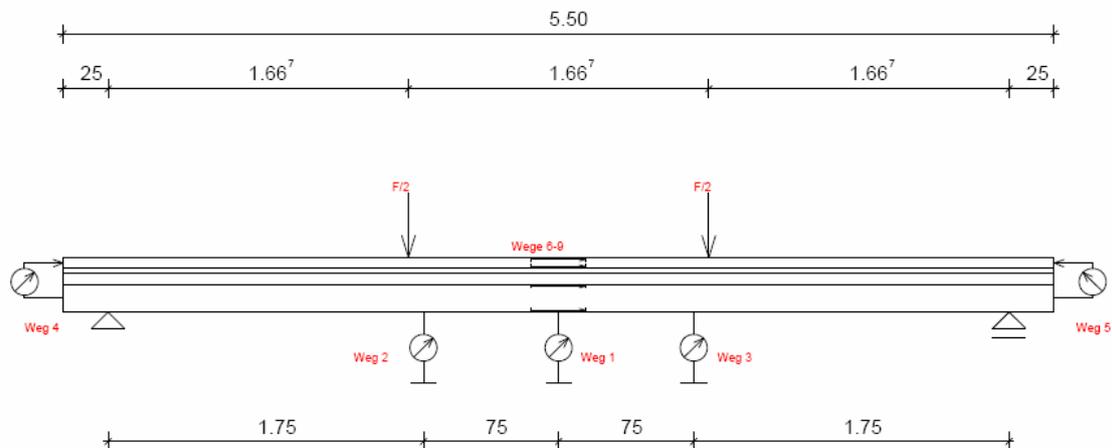


Abbildung 6-31 Messstellen Belastungsversuche



Abbildung 6-32  
montierter Seilzugaufnehmer



Abbildung 6-33  
Wegaufnehmer misst Relativverschiebung  
zwischen Estrichplatte und Holz

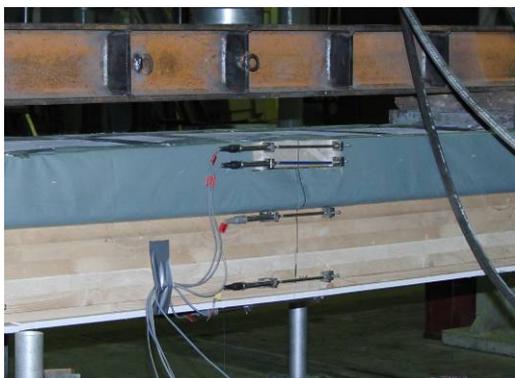


Abbildung 6-34  
Messeinrichtung zur Ermittlung der  
Dehnungsverteilung



Abbildung 6-35  
Messbasis mit DMC plus Messkraftverstärker

### 6.3.4 Versuchskörper

Als Unterkonstruktion wurde eine 450 mm breite und 5,5 m lange Brettsperrholzplatte verwendet, die das Anbringen der Messtechnik ermöglichte und über gut bekannte Materialeigenschaften verfügt, die nur gering schwanken.

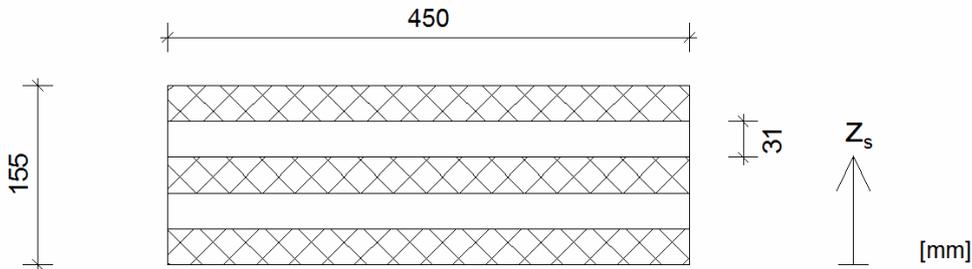


Abbildung 6-36  
Querschnitt Brettsperrholzplatte

Die Biegesteifigkeit des Versuchskörpers wurde nach [DIN EN 408] mit Gleichung 6-1 berechnet:

$$(E \cdot I)_{\text{exp}} = \frac{l^3 \cdot (F_2 - F_1)}{12 \cdot (w_2 - w_1)} \left[ \left( \frac{3a}{4l} \right) - \left( \frac{a}{l} \right)^3 \right] \quad \text{Gleichung 6-1}$$

Aus den Messwerten ergibt sich eine effektive Biegesteifigkeit von  $(E \cdot I)_{\text{exp}} = 13.679.964 \text{ kNcm}^2$

Der Fehler zwischen Messwert und Berechnung liegt für die Rohkonstruktion bei 2,35%. Da der Fehler unter 3% ist, wird keine Anpassung der Eingangsparameter vorgenommen. Es werden die aus Vorversuchen bekannten Werte verwendet.

### 6.3.5 Versuchsprogramm

Tabelle 6-8 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm und den Aufbau der Versuchskörper

Aus Kostengründen können nicht alle verfügbaren Rohbausysteme im „Großen Deckenversuchsstand“ eingebaut und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Dämpfung der Decke experimentell untersucht werden. Aus diesem Grund wird die Materialdämpfung an gelenkig gelagerten Deckenausschnitten von acht unterschiedlichen Rohbausystemen ermittelt. Unter den so geprüften Konstruktionen befinden sich auch die drei, die im „Großen

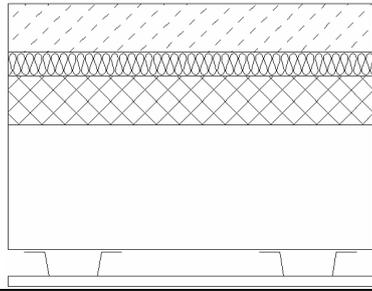
Deckenversuchsstand“ messtechnisch untersucht werden, um die Ergebnisse aller Systeme auf reale Bauwerke übertragen zu können:

Holzbalkendecke mit Holzwerkstoffplatte,

Brettstapeldecke, geklebt,

Brettstapel-Beton-Verbund-Konstruktion (Brettstapel, geklebt; Kerven als Verbindungsmittel).

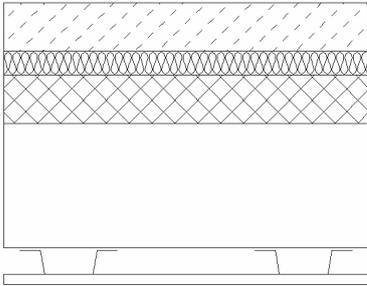
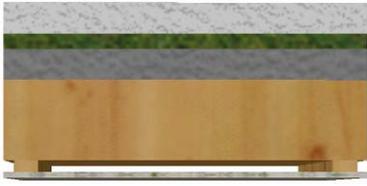
Tabelle 6-8 Versuchsprogramm Kleiner Deckenversuchsstand

Nr.	Bezeichnung	Querschnitt	Versuchsaufbau
1	NES		60 mm Anhydrit- Fließestrich 30 mm Trittschalldämmung aus Steinwolle 60 mm Splitt 2/8 155 mm Brettsperrholzplatte
2	NES-UF		60 mm Anhydrit- Fließestrich 30 mm Trittschalldämmung aus Steinwolle 60 mm Splitt 2/8 155 mm Brettsperrholzplatte Federschiene, abgehängt 12,5 mm Gipskarton
3	NES-UL		60 mm Anhydrit – Fließestrich 30 mm Trittschalldämmung aus Steinwolle 60 mm Splitt 2/8 155 mm Brettsperrholzplatte Holzlattung 22/47 mm 12,5 mm Gipskarton
4	TES		1 Lage OSB, d = 22 mm 30 mm Trittschalldämmung aus Steinwolle 60 mm Splitt 2/8 155 m Brettsperrholzplatte
5	Roh-Sch-TSD		Rohdecke mit Splitt und Dämmung
6	Roh-Sch		Rohdecke mit Splitt
7	Roh		Rohdecke

### 6.3.6 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Belastungsversuche wurden als effektive Biegesteifigkeiten in Tabelle 6-9 dargestellt.

Tabelle 6-9 Effektive Biegesteifigkeiten  $(E \cdot I)_{\text{exp}}$

	Bezeichnung	Querschnitt	$(EI)_{\text{exp}}$ [kN/cm <sup>2</sup> ]	Veränderung zur Rohdecke [%]
1	NES		14.919.960	109,06
2	NES-UF		13.764.309	100,62
3	NES-UL		15.496.202	113,28
4	TES		13.853.362	101,27
5	Roh-Sch-TSD		13.540.882	98,98
6	Roh-Sch		13.494.019	98,64
7	Roh		13.679.964	100,00

### 6.3.7 Auswertung

Auf Grundlage von obiger Tabelle wurden die Anteile der einzelnen Aufbauschichten an der Gesamtsteifigkeit berechnet und in Tabelle 6-10 zusammengefasst.

Tabelle 6-10 Auswertung für Einzelschichten

Aufbauschicht	Masse [kg/m <sup>2</sup> ]	$\gamma$	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
Splitt	81,32	0,01	50
Dämmung	4,12	0	0
OSB	13,28	0,01	4.000
Nassestrich	140,8	0,02	14.000
Unterhangdecke an Sparschalung	11,20	0,15	1.000
Unterhangdecke an Federschiene	11,68	0	1.000

Tabelle 6-10 zeigt, dass nur der Nassestrich und die Unterhangdecke an Sparschalung eine wesentliche Erhöhung der effektiven Biegesteifigkeiten bewirken. Alle anderen Aufbauschichten können nur einen geringen beziehungsweise gar keinen Beitrag zur effektiven Biegesteifigkeit des Gesamtsystems leisten.

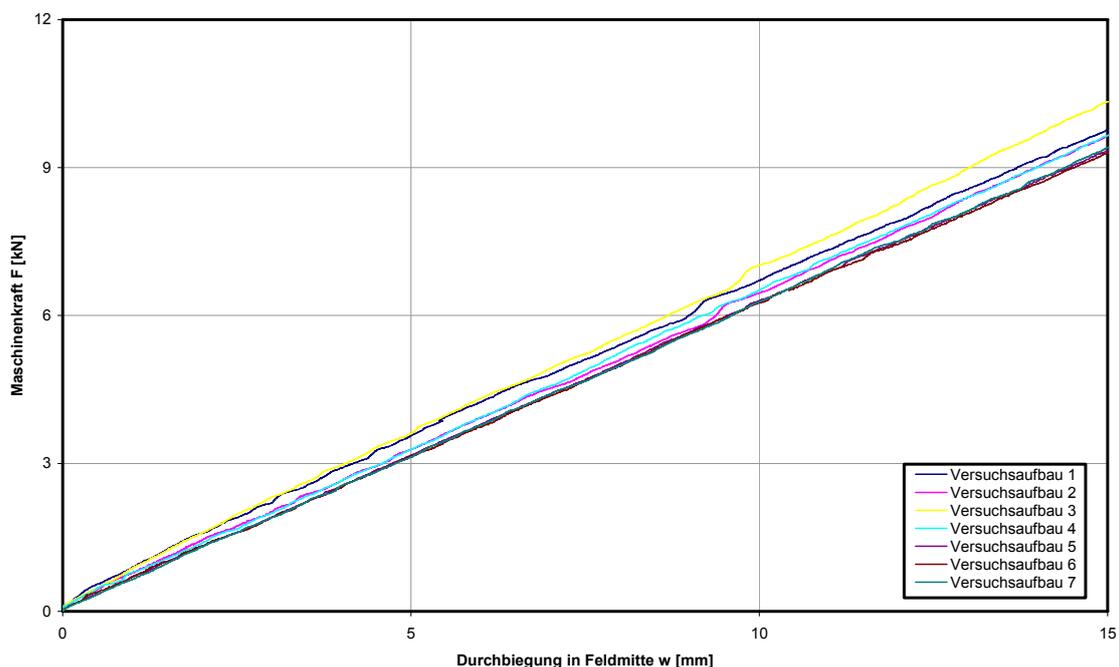


Abbildung 6-37  
Kraft - Weg - Diagramme aller Versuchsaufbauten

In Abbildung 6-37 sind die Kraft–Weg–Diagramme für alle Versuchsaufbauten dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass Versuchsaufbau 3 (NES-UL: Nassestrich mit Unterhangdecke an

Sparschalung) die größte Steifigkeit besitzt. An zweiter Stelle liegt Versuchsaufbau 1 (NES: Nassestrich), dicht gefolgt von den Aufbauten 2 (NES-UF: Nassestrich mit Unterhangdecke an Federschienen). Der im Versuchsaufbau 4 (TES: Trockenestrich) untersuchte Trockenestrich erhöht die Biegesteifigkeit der Decke nur gering.

Deutlich wird dabei, dass der Estrich Verbundkräfte aktivieren kann, obwohl er über einer Schicht liegt, die keinen Verbund zur Tragkonstruktion aufweisen kann. Durch die hohe Masse des Anhydrit- Estrichs wird durch Reibung ein teilweiser Verbund erreicht. Es erfolgt eine (geringe) Kraftübertragung über die Verbundfuge.

Bei den Versuchen zur Biegesteifigkeit wurden die Dehnwege über die Querschnittshöhe aufgezeichnet. Diese Messwerte wurden zur Ermittlung der Dehnungsverteilung über den Querschnitt genutzt, um zu ermitteln, ob die Ausbaukonstruktionen einen Einfluss auf die effektive Biegesteifigkeit haben. Abbildung 6-38 zeigt die Dehnungsverteilung von Versuchsaufbau 3, dass die auf einer Sparschalung befestigte Unterhangdecke nachgiebig mit der Rohdecke verbunden ist, vgl. den kleinen Sprung am Übergang zwischen beiden Schichten.

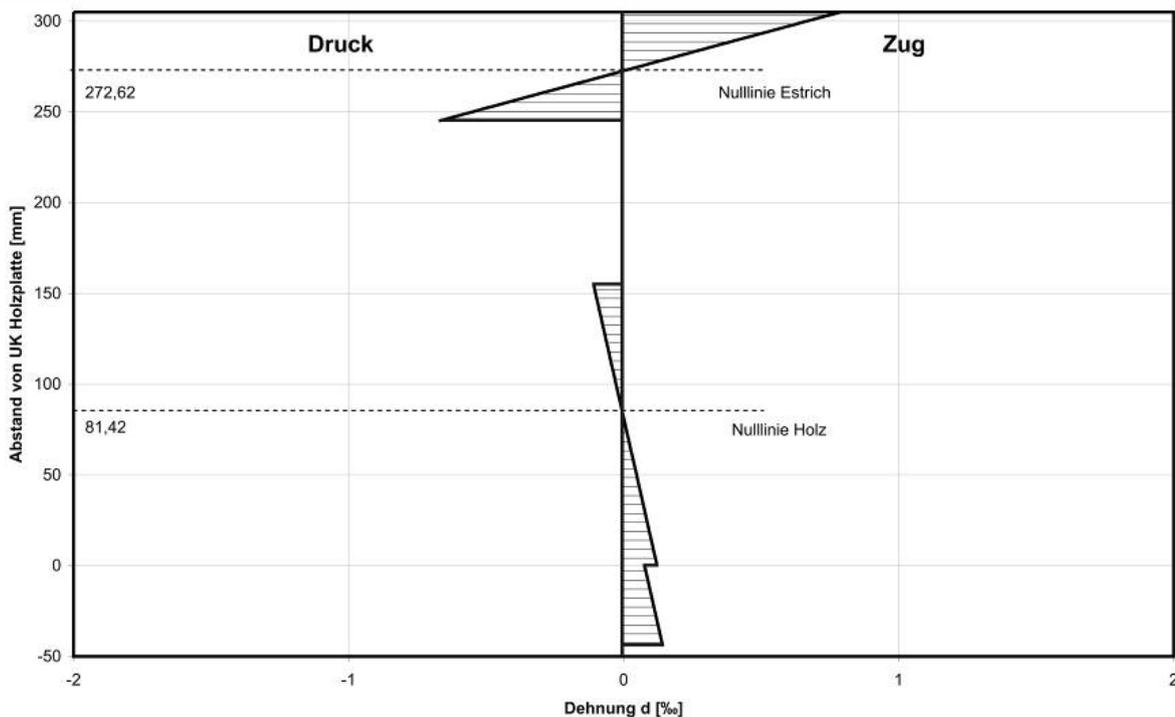


Abbildung 6-38  
Dehnungsverteilung mit Unterhangdecke an Sparschalung

## 6.4 Dynamische Steifigkeit bzw. Verlustfaktor (Materialdämpfung)

### 6.4.1 Allgemeines

Aus Kostengründen konnten nicht alle verfügbaren Ausbausysteme (Unterhangdecken und Estrich-Schichten) im Großen Deckenstand eingebaut und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Querbiegesteifigkeit und die Dämpfung der Decke experimentell untersucht werden. Gleichzeitig ergab die Auswertung der Dämpfungswerte der Decken im Großen Deckenversuchsstand eine große Schwankungsbreite, da sich hier die Einflüsse aus Lagerung, Material und Amplitudengröße überlagern.

Ziel ist es daher, die Dämpfung mit Hilfe von weniger aufwändigen Versuchsaufbauten zu ermitteln. Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte untersucht werden, ob dafür der zwischen dynamischer Steifigkeit und dem Dämpfungsvermögen vermutete Zusammenhang genutzt werden kann.

Gemessen wird die vertikale Grundschiwingung, aus der die Transferfunktion aus eingeleiteter Kraft und resultierender Beschleunigung bestimmt wird nach dem Prinzip:

$$Y(f) = H(f) * X(f) \quad \text{Gleichung 6-2}$$

Die Berechnung des Verlustfaktors erfolgt über die Halbwertsbreite mit:

$$\eta = \frac{f_o - f_u}{f_r} \quad \text{Gleichung 6-3}$$

Dabei lässt sich der Verlustmodul für longitudinale Anregung aus dem Verlustfaktor bestimmen. Diese Ergebnisse sind nicht übertragbar auf den Verlustmodul bei Biegeschwingungen. Die für die Ermittlung des Verlustmoduls für Biegeschwingungen bestehenden Untersuchungsmethoden sind sehr aufwändig und daher hier nicht zielführend.

### 6.4.2 Messverfahren

Für ausgewählte Ausbaukombinationen war geplant, die dynamische Steifigkeit in Anlehnung an [DIN EN ISO 29 052] zu ermitteln. Die Auswertung der Ergebnisse sollte Aussagen zu einem vermuteten Zusammenhang zwischen dynamischer Steifigkeit und Dissipationsvermögen des Materials ermöglichen. Nach Auswertung der Literatur wird der Verlustfaktor in Anlehnung an [DIN EN ISO 6721-1] ermittelt. Für die Versuchsdurchführung wird der Versuchsstand nach [DIN EN ISO 29 05] der MFPA Leipzig verwendet.

Die dynamische Steifigkeit sowie der Verlustfaktor lassen sich mit Hilfe einer Resonanzmessmethode (auch Resonanzkurvenverfahren) bestimmen. Als Referenzmessverfahren gilt bei der Bestimmung der dynamischen Steifigkeit die Anregung durch ein sinusförmiges Signal. Dieses Messverfahren ist jedoch aufwendiger und kann gewisse Einschränkungen mit sich bringen. In diesem Fall war es der messbare Frequenzbereich der Resonanzfrequenz bis maximal 250 Hz. Abbildung 6-39 zeigt den schematischen Versuchsaufbau.

Aus diesem Grund wurde das Verfahren mit Impulsanregung ebenfalls getestet. Bei diesem Verfahren können allerdings gewisse Rotationsanteile die Messung beeinflussen.

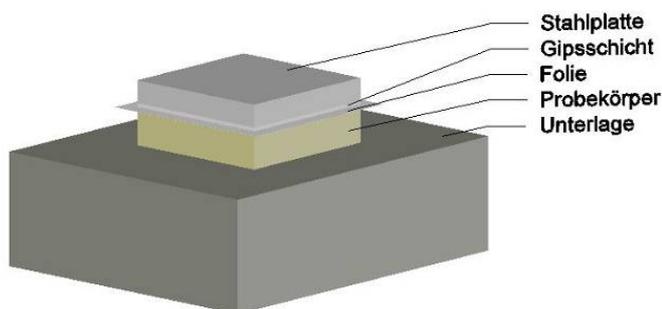


Abbildung 6-39  
Versuchsstand zur Ermittlung der Materialdämpfung

### 6.4.3 Versuchsprogramm

Tabelle 6-11 Nichtakustische Eigenschaften der getesteten Materialien (200 mm x 200 mm)

Materialbezeichnung	Dicke mm	Gewicht g	Rohdichte kg/m <sup>3</sup>
Damtec Estra 8 mm (Elastomer)	8	266,7	833
Heralan TPE 30-2	30	154	125
Splitt	90	5662,8	1573
Damtec Estra 6 mm (Elastomer)	6,15	206	813
Wabe mit Schüttung	30	1571	1309
BauderTEC KSD DUO, 1-lagig	1,5	65	1083

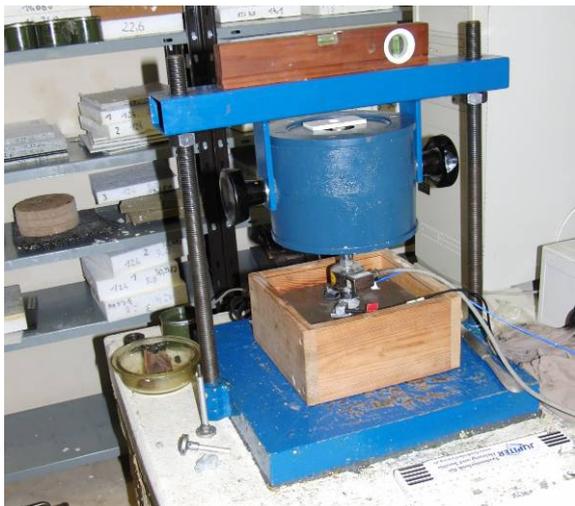


Abbildung 6-40  
Versuchsstand zur Ermittlung der Materialdämpfung mit Shaker, am Beispiel Splitt

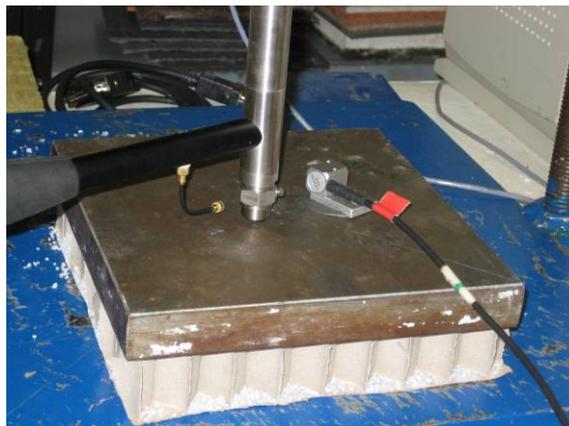


Abbildung 6-41  
Versuchsstand zur Ermittlung der Materialdämpfung mit Impulshammer, am Beispiel Wabe

#### 6.4.4 Messergebnisse

Anhang D zeigt die zugehörigen Messdiagramme und Fotos.

##### 6.4.4.1 Messung mit Shaker

Tabelle 6-12 Verlustfaktor und dynamische Steifigkeit der getesteten Materialien, Messung mit Shaker

Materialbezeichnung	Resonanzfrequenz $f_R$ [Hz]	dynamische Steifigkeit $s'$ [MN/m <sup>3</sup> ]	untere Frequenzgrenze $f_u$ [Hz]	obere Frequenzgrenze $f_o$ [Hz]	Verlustfaktor
3 x 8 mm Damtec Estra	66	34,4	58	86	0,42
30 mm Mineralwolle	33,5	8,9	24	44,2	0,60
90 mm Splitt	145,7	167,6	131	150	0,12 - 0,17
2 x 6 mm Damtec Estra	79,8	50,3	68,2	101,5	0,42
Wabe mit Schüttung	106,5	89,6	98,5	116,4	0,17

### 6.4.4.2 Messung mit Impulshammer

Tabelle 6-13 Verlustfaktor und dynamische Steifigkeit der getesteten Materialien, Messung mit Impulshammer

Materialbezeichnung	Resonanzfrequenz fR [Hz]	dynamische Steifigkeit s' [MN/m <sup>3</sup> ]	untere Frequenzgrenze fu [Hz]	obere Frequenzgrenze fo [Hz]	Verlustfaktor
3 x 8 mm Damtec Estra (fein)	62,6	30,9	53,1	71,3	0,29
30 mm Heralan TPE 30-2	39,6	12,4	35	41,5	0,16
2 x 6 mm Damtec Estra (grob)	70,5	39,2	59,4	79	0,28
Wabe mit Schüttung (mit Plastekappe)	150	177,7	89	172	0,55
Wabe mit Schüttung (mit Gummikappe)	125	123,4	88	159	0,57
BauderTEC KSD DUO, 1-lagig (mit Plastekappe)	572	2583,3	320	723	0,70
BauderTEC KSD DUO, 1-lagig (mit Gummikappe)	589	2739,2	363	800	0,74

### 6.4.5 Auswertung

Die Ergebnisse der Messungen mit Shaker stimmen mit den Literaturwerten [Frasold, Veres] überein. Die Messungen mit Impulshammer hingegen sind nicht stimmig. Dies hängt eventuell mit Deformationseffekten innerhalb der Struktur bei Krafteinwirkung zusammen. Weiterhin können gewisse Rotationsanteile die Messung beeinflussen. Es hat sich auch gezeigt, dass die Wahl der Hammerkappe eine Rolle spielt.

Ein Vergleich mit den Ergebnissen des Großversuchs ist nicht möglich, da hier die Schichten nur in Kombinationen eingebaut wurden.

## 6.5 Materialkennwerte Anhydrit- Estrich

Es wurden vier Nassestriche aus Anhydrit und vier Trockenestriche in den großen Deckenversuchsstand eingebaut. Der zuerst eingebaute Nassestrich NE-1 wurde auch für die Herstellung der Versuchskörper zur Ermittlung der Biegesteifigkeit von Ausbaukonstruktionen eingesetzt. Um Vergleichsrechnungen von Hand und mit FEM zu ermöglichen, wurde die am 23.10.2008 hergestellte Charge NE-1 untersucht.



Abbildung 6-42  
Anhydrit- Estrich- Zylinder,  $d = 150 \text{ mm}$



Abbildung 6-43  
Anhydrit- Estrich- Prismen

Die 6 Prismen ( $40 \times 40 \times 160$ ) lagerten bis zur Prüfung bei  $20^\circ\text{C}$  und  $65\%$  re. LF. Die Bestimmung der Prismenbiegezugfestigkeit und –druckfestigkeit erfolgte am 17.11.2008 nach DIN 13.892-2. Der Mittelwert der Druckfestigkeit wurde ermittelt mit  $\beta_{\text{dr}} = 29,5 \text{ N/mm}^2$ .

An 6 Zylindern mit einem Durchmesser von  $150 \text{ mm}$  wurde die Längs- und Querdehnung nach DIN 18555-4 bestimmt. Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit wurde mit  $f_{c,\text{dry}} = 12,3 \text{ N/mm}^2$  ermittelt. Nach der Verformungsmessung betrug der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit  $f_c = 12,1 \text{ N/mm}^2$ . Die Feuchtrohdichte wurde mit  $\rho_{2f} = 2170 \text{ g/cm}^3$  ermittelt. In Auswertung der Dehnungsmessungen wurde der mittlere Elastizitätsmodul ermittelt mit  $E_m = 13.594 \text{ N/mm}^2$ , vgl. Tabelle 6-14 und Abschnitt 9.2.5.

Tabelle 6-14 Ermittlung E-Modul Anhydrit- Estrich nach DIN 18555-4

				Mittelwert
E [N/mm <sup>2</sup> ]	14.655,47	12.386,41	13.740,06	13.593,98
$\mu$	0,3	0,25	0,28	0,28

## 6.6 Materialkennwerte Elastomerlager

Die Auflagerung der Deckenfelder im Großen Deckenversuchsstand und der Holzbalken (Abschnitt 6.2.8) erfolgte teilweise auf Elastomerlagern. Als Material wurde Damtec Estra 8 mm verwendet. Die Materialeigenschaften wie dynamische Steifigkeit und Verlustfaktor können den Tabellen Tabelle 6-4 ff im Abschnitt 6.4 entnommen werden.

## 6.7 Materialkennwerte Trittschalldämmung

Die im Großen Deckenversuchsstand und bei der Ermittlung der Biegesteifigkeit von Ausbaukonstruktionen verwendete Nass- und Trockenestrich wurde auf Trittschalldämmung Heralan TPE 30-2 eingebaut.

Die Materialeigenschaften wie dynamische Steifigkeit und Verlustfaktor können den Tabellen Tabelle 6-11ff im Abschnitt 6.4 entnommen werden.

## 6.8 Materialkennwerte Holzbalken

Zur Ermittlung der Eingangsgrößen für die Vergleichsrechnungen mit FEM oder von Hand wurden die Materialkennwerte von drei Holzbalken nach [DIN EN 408] ermittelt, die zusammen mit der Holzbalkendecke für den Großen Deckenversuchsstand geliefert wurden und aus der gleichen Charge stammten. Es wurden nicht, wie ursprünglich geplant, die Holzbalken aus dem Versuchsstand untersucht, da diese Balken mit der Holzwerkstoffplatte verklebt und geklammert war. Bei der Trennung der beiden Bauteile, wären die Balken an der Oberseite zerstört wurden und hätten anschließend falsche Ergebnisse für die E-Moduln ergeben. Ein weiterer Grund ist, dass die Materialkennwerte der Balken für die Modellierung mit FEM bereits erforderlich waren, während die Decke noch im Versuchsstand untersucht wurde.

Tabelle 6-15 Materialkennwerte Holzbalken (Großer Deckenversuchsstand)

Lagerungsart		Balken 1	Balken 2	Balken 3	
Abmessungen:	mm	100,0	100,0	100,0	
	mm	220,0	220,0	220,0	
	mm	5.400,0	5.000,0	5.000,0	
Stützweite:	mm	4.620,0	4.620,0	4.620,0	
Rohdichte:	kg/m <sup>3</sup>	450	450	450	

		Mittelwert Balken 1	Mittelwert Balken 2	Mittelwert Balken 3	Mittelwert alle Balken
<b>Lagerung ideal gelenkig auf Rolle und Prisma</b>					
1. Eigenfrequenz	Hz	24,94	23,00	24,46	24,13
max. Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>	9,39	6,57	9,14	8,37
Beschleunigung 10 Perioden	m/s <sup>2</sup>	4,69	3,08	6,27	4,68
E-Modul:	N/mm <sup>2</sup>	12.811	10.894	12.325	12.010
Dämpfung:	%	1,10	1,19	0,61	0,97
<b>Lagerung auf Elastomer</b>					
1. Eigenfrequenz	Hz	22,56	21,03	23,34	22,31
max. Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>	7,89	11,25	9,35	9,50
Beschleunigung 10 Perioden	m/s <sup>2</sup>	1,14	2,27	2,54	1,99
E-Modul:	N/mm <sup>2</sup>	10.482	9.108	11.220	10.270
Dämpfung:	%	3,08	2,54	2,08	2,57
<b>Lagerung auf Schwellholz</b>					
1. Eigenfrequenz	Hz	22,86	22,42	23,72	23,00
max. Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>	7,70	7,09	8,60	7,79
Beschleunigung 10 Perioden	m/s <sup>2</sup>	1,83	3,96	4,59	3,46
E-Modul:	N/mm <sup>2</sup>	10.765	10.352	11.587	10.902
Dämpfung:	%	2,28	0,92	1,00	1,40
<b>Mittelwerte je Balken</b>					
1. Eigenfrequenz	Hz	23,45	22,15	23,84	
max. Beschleunigung	m/s <sup>2</sup>	8,33	8,30	9,03	
Beschleunigung 10 Perioden	m/s <sup>2</sup>	2,55	3,11	4,47	
E-Modul:	N/mm <sup>2</sup>	11.353	10.118	11.711	
Dämpfung:	%	2,15	1,55	1,23	



# 7 Finite Elemente Methode

## 7.1 Allgemeines

Ursprünglich war geplant, das Schwingungsverhalten rechnerisch zu modellieren, weil die FEM-Analyse ein ideales Werkzeug ist, um zuverlässig und kostengünstig unterschiedliche Varianten bezüglich Abmessungen und Aufbauten der Decken etc. (Parameterstudie) und deren Auswirkungen zu untersuchen. Zur Systemkontrolle wurden im Labor und in situ ermittelte Ergebnisse sowie aus der Literatur entnommene Werte verwendet.

Für die erste Eigenfrequenz wurde eine gute Übereinstimmung erzielt. Der Vergleich der höheren Eigenfrequenzen ergab allerdings große Unterschiede. Die hohen Eigenfrequenzen haben jedoch – nach Ansicht der Autorinnen – keinen praxisrelevanten Einfluss auf das Empfinden des Schwingungsverhaltens.

Bei der Auswertung der Laboruntersuchungen stellte sich heraus, dass nicht immer alle höheren Eigenformen gemessen wurden, was den Abgleich mit den FEM-Ergebnissen zusätzlich erschwerte.

## 7.2 Modellfindung und erste Ergebnisse

Mit der Software [ANSYS] wurde der 1. Versuchsstand in Leipzig (siehe Abbildung 6-9) modelliert, einmal mit Volumen, einmal mit Scheiben- / Plattenelementen. Die Eingangswerte und der genaue Weg der Modellfindung, sowie die Unterschiede bei der Verwendung der 3D- und 2D- Elemente können in [Hoheisel, 2009] nachgelesen werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt.

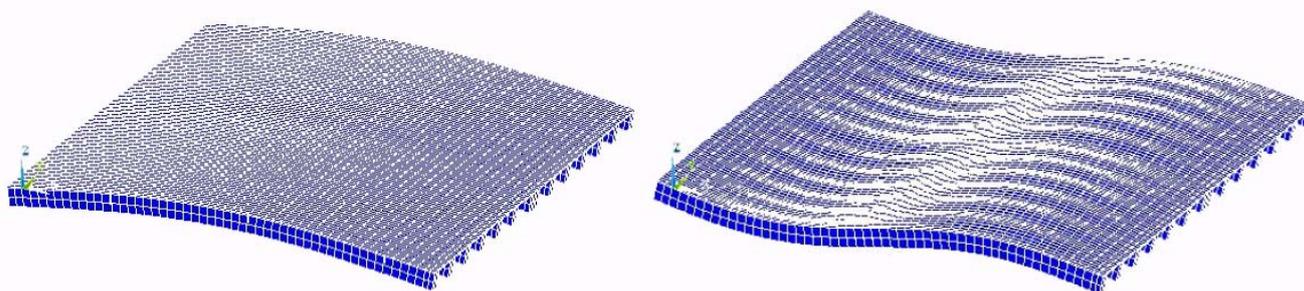


Abbildung 7-1

1. und 15. Eigenform der FEM-Modells des 1. Versuchsstandes als Rohdecke mit Eigenfrequenzen von ca. 16 Hz bzw. 62 Hz

### 7.3 Vergleich der berechneten mit den gemessenen Frequenzen

In Abbildung 7-2 sind die berechneten Frequenzen den gemessenen Frequenzen gegenübergestellt. Die Werte beziehen sich auf das Modell des 1. Versuchsstandes als Rohdecke.

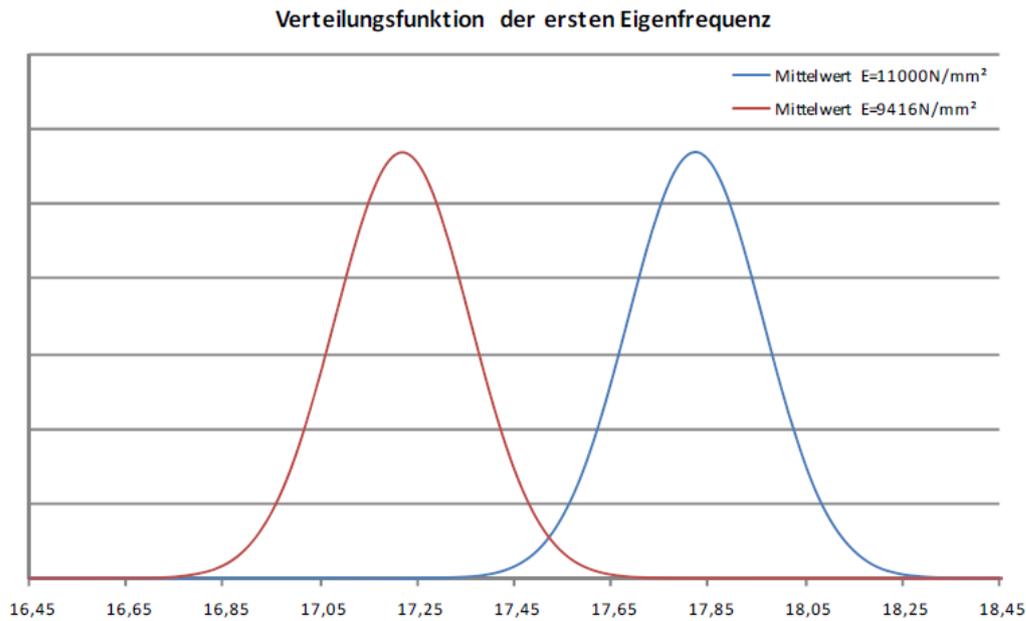
Mode	Frequenzen [Hz]			Messung Frequenzen	
		11	43.209		
1	16.069	12	46.218		[Hz]
2	17.144	13	46.665	1	15.00
3	20.005	14	52.052	2	18.45
4	23.401	15	61.706	3	20.60
5	26.276	16	62.627	4	27.50
6	29.940	17	65.507	5	33.90
7	32.352	18	68.847	6	41.35
8	36.223	19	72.850	7	45.90
9	38.160	20	77.081	8	54.70
10	41.952				

Abbildung 7-2

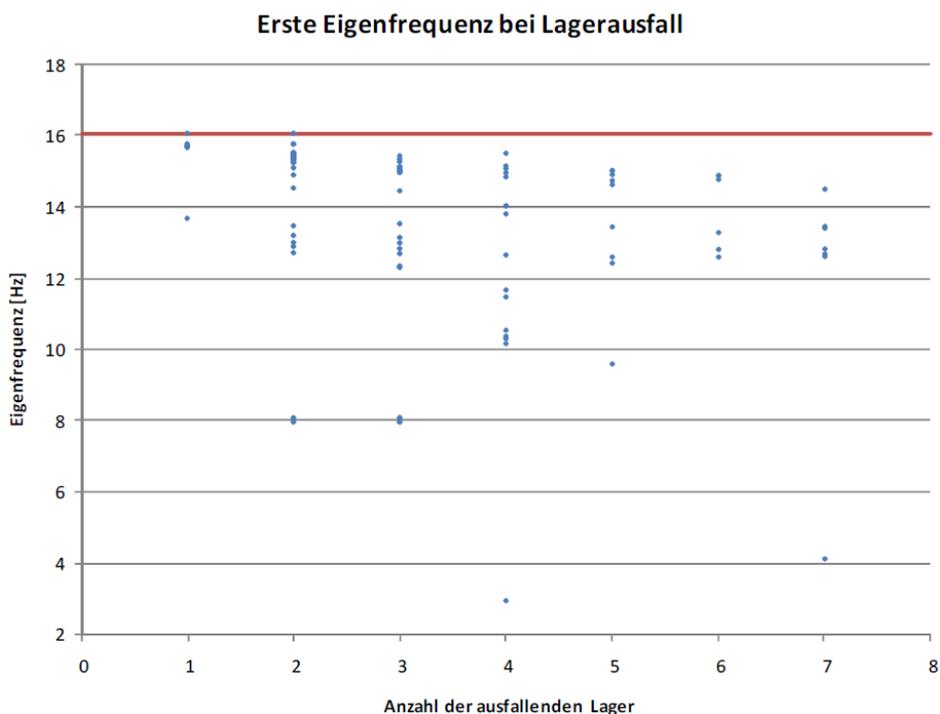
Eigenfrequenzen der ersten 20 berechneten Moden und der ersten 8 gemessenen Moden

### 7.4 Parameterstudien

Wegen der Abweichungen wurden weitere Berechnungen mit Variationen der E-Moduln und Massen der Holzbalken durchgeführt, siehe Abbildung 7-3 . In einem weiteren Schritt wurde auch der Fall von Auflagerausfall untersucht, weil die modellierte Rohdecke so leicht und gleichzeitig so steif ist, dass sie nicht immer auf allen Auflagern satt aufliegt, vgl. Abbildung 7-4.



**Abbildung 7-3**  
 Ergebniskurven für die erste Eigenfrequenz aus der Variation der E-Moduln und Massen der Holzbalken



**Abbildung 7-4**  
 Ergebnisse für die erste Eigenfrequenz nach Modellierung von Auflagerausfällen unterschiedlich vieler Balken

## 7.5 Ergebnis

Der erste Versuchsstand an der MFPA in Leipzig wurde als FEM-Modell abgebildet. Das FEM-Modell wurde mit 3D- und 2D- Elementen ausgebildet, Parameter wie E-Modul und Masse wurden variiert und der Fall von nicht aufliegenden Balken- Enden nachgestellt.

So konnte die berechnete Eigenfrequenz der gemessenen Eigenfrequenz angenähert werden.

Das interessantere Ergebnis ist, dass die höheren Eigenformen und -frequenzen zwar der Kalibrierung des Modells dienen, für das subjektive Empfinden fast keine Rolle spielen.

Weil die in-situ-Messungen zeigten, wie groß die Unterschiede von berechneter und gemessener erster Eigenfrequenz bei den tatsächlich eingebauten Decken sind (vgl. Abbildung 8-10) und die höheren Eigenfrequenzen unbedeutend werden, wurden auf weitere FEM-Berechnungen verzichtet – zugunsten einer zwei- bis drei- fachen Anzahl an in-situ-Messungen. Dies geschah in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss.

## 8 Auswertung und Vergleich der Messungen in situ, im Labor sowie der Berechnungen

### 8.1 Allgemeines

Die aus in-situ-Messungen und den Laboruntersuchungen vorhandenen Messdaten werden ausgewertet, um Rückschlüsse auf wesentliche Parameter und ihre Grenzwerte für die Beurteilung des Schwingungsverhaltens ziehen zu können. Dafür werden unterschiedliche Auswertemodelle auf ihre Eignung untersucht.

In diesem Kapitel wird die Wegfindung zu den tatsächlich gewählten Konstruktions- und Bemessungsregeln aufgezeigt. D.h. es werden anfangs auch die „Irrwege“ gezeigt, um dem Leser die Gedankengänge der Autorinnen mitzugeben.

### 8.2 Untersuchung mit dem „Solver“ [Excel]

#### 8.2.1 Beschreibung Modelle und zugehörige Ergebnisse

Die Parameter  $\alpha$  bis  $\varphi$  bzw.  $\Delta$  werden jeweils mit dem Excel- Programmteil „Solver“ angenähert, so dass die rechnerische Auswertung möglichst nah an die tatsächliche Bewertung angenähert werden kann. Dabei wird jeweils die Differenz aus rechnerischer Auswertung und tatsächlicher Bewertung gebildet und quadriert. Die Summe der sog. Abstandskvadratrate aller Messungen (im Normalfall) und aller „Standard- Messungen“ mit Nassestrich (im Fall „Auswertung\_x a) wird minimiert.

$$\sum (Auswertung\_x - Bewertung)^2 = Minimum$$

Gleichung 8-1

Modell 1

$$Auswertung_{-1} = f^\alpha \cdot v^\beta \cdot a^\gamma \cdot w(1kN)^\delta + \Delta$$

	ALLE		NUR NassEstrich
alpha	0,12704917	Frequenz	-0,65331487
beta	0,07452966	v_Heeldrop	0,48624107
gamma	0,04933435	a_Resonanz	-0,02957825
delta	0,60009909	w(1kN)	-0,00262611
epsilon			
phi			
groß delt	0,84369933	DELTA	0,19210394

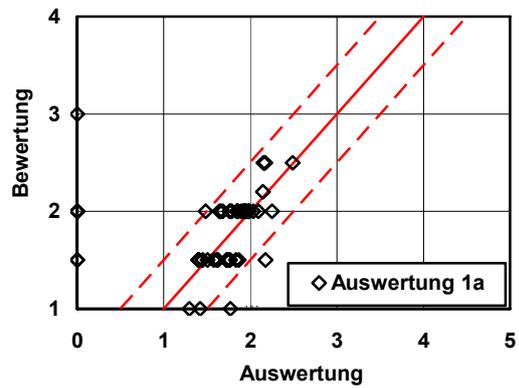
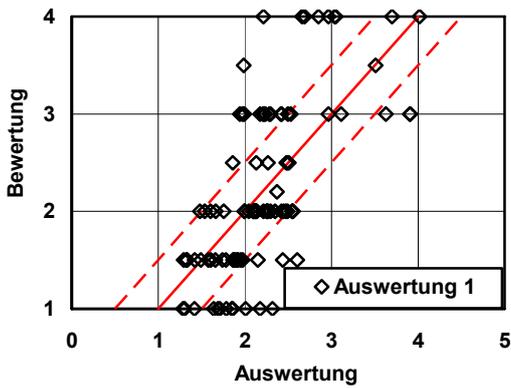


Abbildung 8-1  
Modell 1 zur Auswertung mit dem „Solver“

Modell 1-1

$$Auswertung_{-11} = f^\alpha \cdot w(1kN)^\delta \cdot D^\phi + \Delta$$

	ALLE		NUR NassEstrich
alpha	0,224390115	Frequenz	0,650053076
beta	0	v_Heeldrop	0
gamma	0	a_Resonanz	0
delta	0,591830617	w(1kN)	1,698548069
epsilon			0
phi	-0,070129468	Dämpfung	0,712313989
groß delta	0,568232448	DELTA	1,568354985

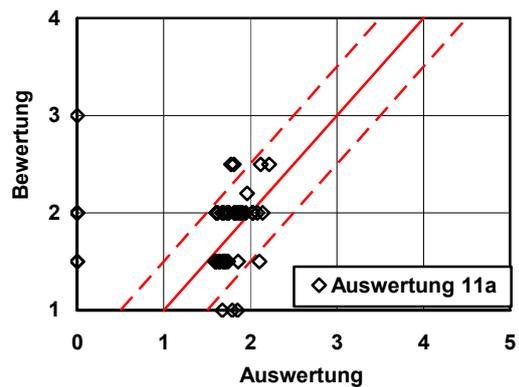
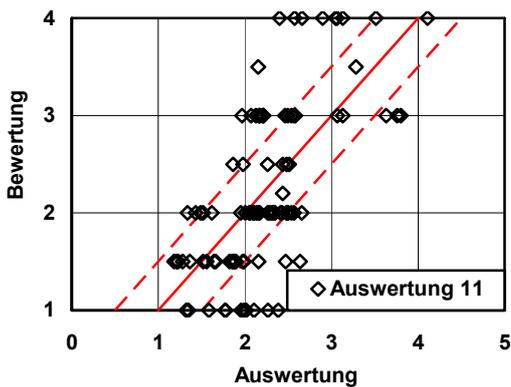


Abbildung 8-2  
Modell 1-1 zur Auswertung mit dem „Solver“

Modell 2

$$Auswertung\_2 = m^\alpha \cdot EI_{l\ddot{a}ngs}^\beta \cdot EI_{quer}^\gamma \cdot b^\delta \cdot \ell^\epsilon \cdot D^\phi + \Delta$$

	ALLE		NUR NassEstrich
alpha	-0,14443623	Masse	-0,125777073
beta	-0,29537972	El_l\ddot{a}ngs	-0,170588758
gamma	-0,06042721	El_quer	-0,147103061
delta	0,25336567	Breite	0,15142479
epsilon	0,83062044	Spannweite	0,217526022
phi	0,03438824	D\ddot{a}mpfung	-0,074217492
gro\ddot{u}\ss delta	0,26637039	DELTA	0,680510361

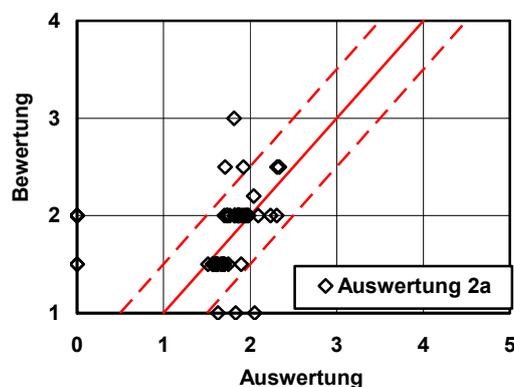
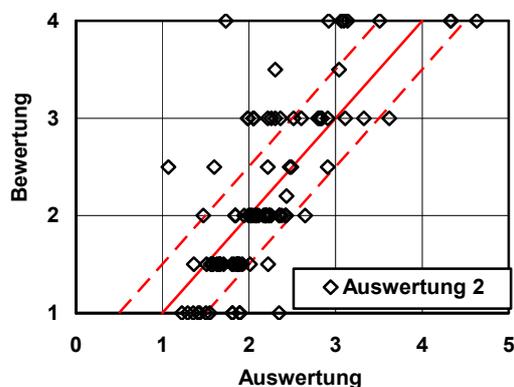


Abbildung 8-3  
Modell 2 zur Auswertung mit dem „Solver“

Modell 3

$$Auswertung\_3 = \left(\frac{f}{6,0}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{v}{10}\right)^\beta \cdot \left(\frac{a}{0,1}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{w(1kN)}{0,5}\right)^\delta + \Delta$$

	ALLE		NUR NassEstrich
alpha	-0,01881458	Frequenz	-0,887443408
beta	0,00904193	v_Heeldrop	0,169995211
gamma	0,1350766	a_Resonanz	0,282129357
delta	0,4990015	w(1kN)	-0,299493311
epsilon			
phi			
gro\ddot{u}\ss delta	0,79474987	DELTA	-0,44871379

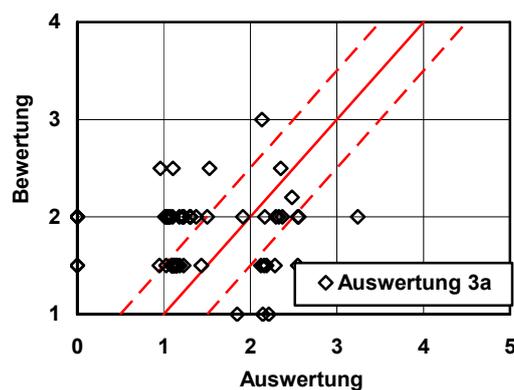
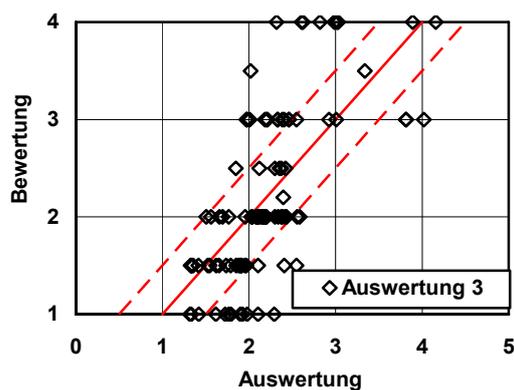


Abbildung 8-4  
Modell 3 zur Auswertung mit dem „Solver“

Modell 4

$$Auswertung_{-4} = \frac{w(1kN_{b=1m})^y}{\left(\frac{Grenzwert}{\ell^\beta}\right)} + \Delta$$

ALLE		NUR NassEstrich
0,28	Grenzwert	0,439287832
-0,23	Potenz Spann	-0,435385627
0,44	Potenz	0,346969731
0,15	Konstante	0,829148598

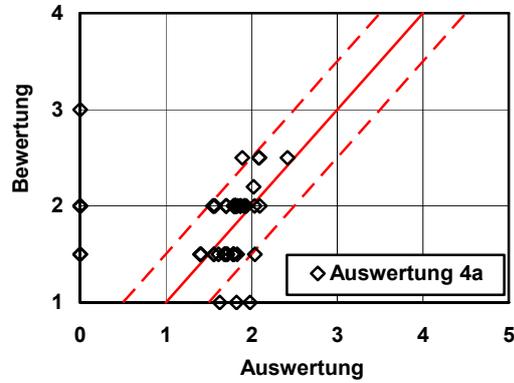
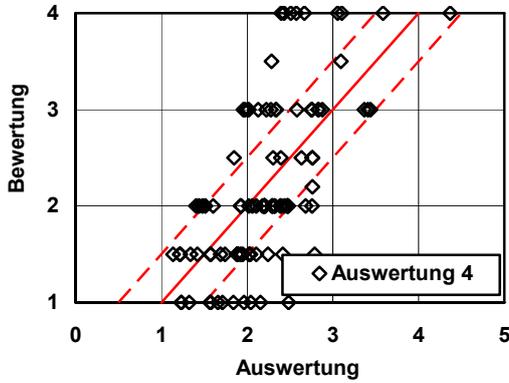


Abbildung 8-5  
Modell 4 zur Auswertung mit dem „Solver“

Modell 4-1

$$Auswertung_{-41} = \frac{w(1kN_{b\_eff})^y}{\left(\frac{Grenzwert}{\ell^\beta}\right)} + \Delta$$

ALLE		NUR NassEstrich
0,84	Grenzwert	0,570144883
0,42	Potenz Spann	-0,105472137
0,57	Potenz	0,450445383
0,96	Konstante	1

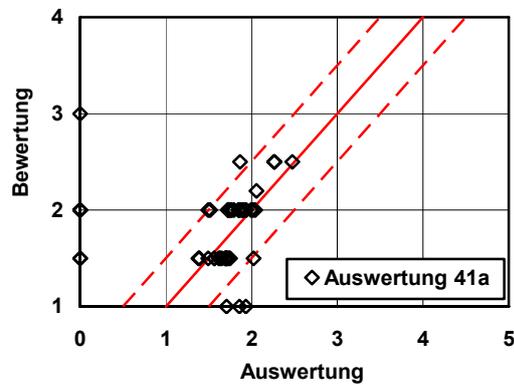
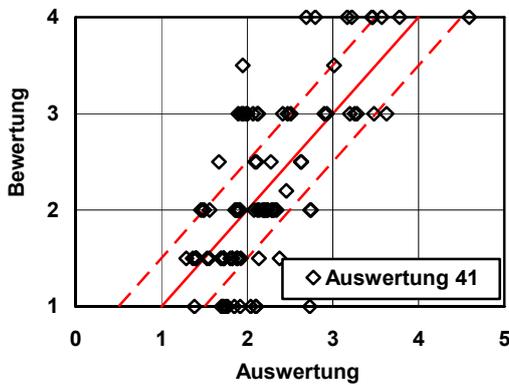


Abbildung 8-6  
Modell 4-1 zur Auswertung mit dem „Solver“ nur für Decken mit Nassestrich

## Modell 4-1

$$Auswertung_{41} = \frac{w(1kN_{b\_eff})^\gamma}{\left(\frac{Grenzwert}{\ell^\beta}\right)} + \Delta$$

NUR TrockenEstrich

Grenzwert	0,625771074
Potenz Spann	0,290785132
Potenz	0,103445871
Konstante	0,972535806

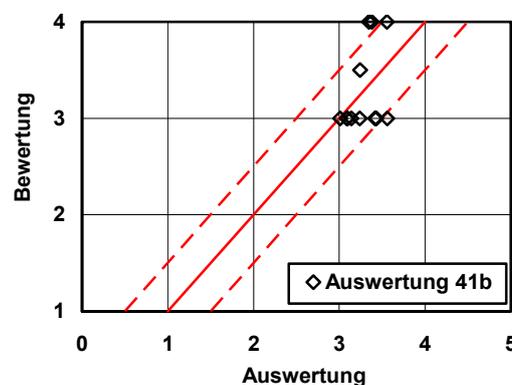


Abbildung 8-7

Modell 4-1 zur Auswertung mit dem „Solver“ nur für Decken mit Trockenestrich

### 8.2.2 Schlussfolgerungen aus der Auswertung mit dem „Solver“

Die Auswertungsvariante (Modell 4-1) – getrennt für Nass- und Trockenestriche – weist die beste Näherung zwischen rechnerischer Auswertung und subjektiver Bewertung auf:

- Die Potenz für die Spannweite wird als sehr klein angesehen und zu Null gesetzt, weshalb die Spannweite nicht zusätzlich in die Gleichung eingeht.
- Frequenz streut zu stark, deshalb vorläufig keine weitere Berücksichtigung im nächsten Schritt
- Steifigkeitskriterium

Gleichzeitig wird der große Einfluss der Konstruktion und der Ausbauart auf das subjektiv empfundene Schwingungsverhalten deutlich.

Im nächsten Schritt erfolgt daher eine genauere Unterscheidung nach Deckenaufbauart.

## **8.2.3 Auswertung mit dem „Solver“ getrennt nach vier Konstruktionstypen**

### **8.2.3.1 Aufteilung in vier Konstruktionstypen:**

- Rohdecken, d.h. Decken ohne Aufbau
- Decken mit schwimmendem Trockenestrich
- Decken mit schwimmendem Nassestrich
- HBV- Decken mit schwimmendem Estrich

Besondere Konstruktionen und elastisch auf Unterzügen gelagerte Decken werden gesondert aufgeführt.

### **8.2.3.2 Eingabeparameter für Solver**

### Frequenzkriterium

Abbildung 8-8 zeigt den Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung und gemessener Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Konstruktionsart.

Abbildung 8-9 zeigt den Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung und berechneter Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Konstruktionsart.

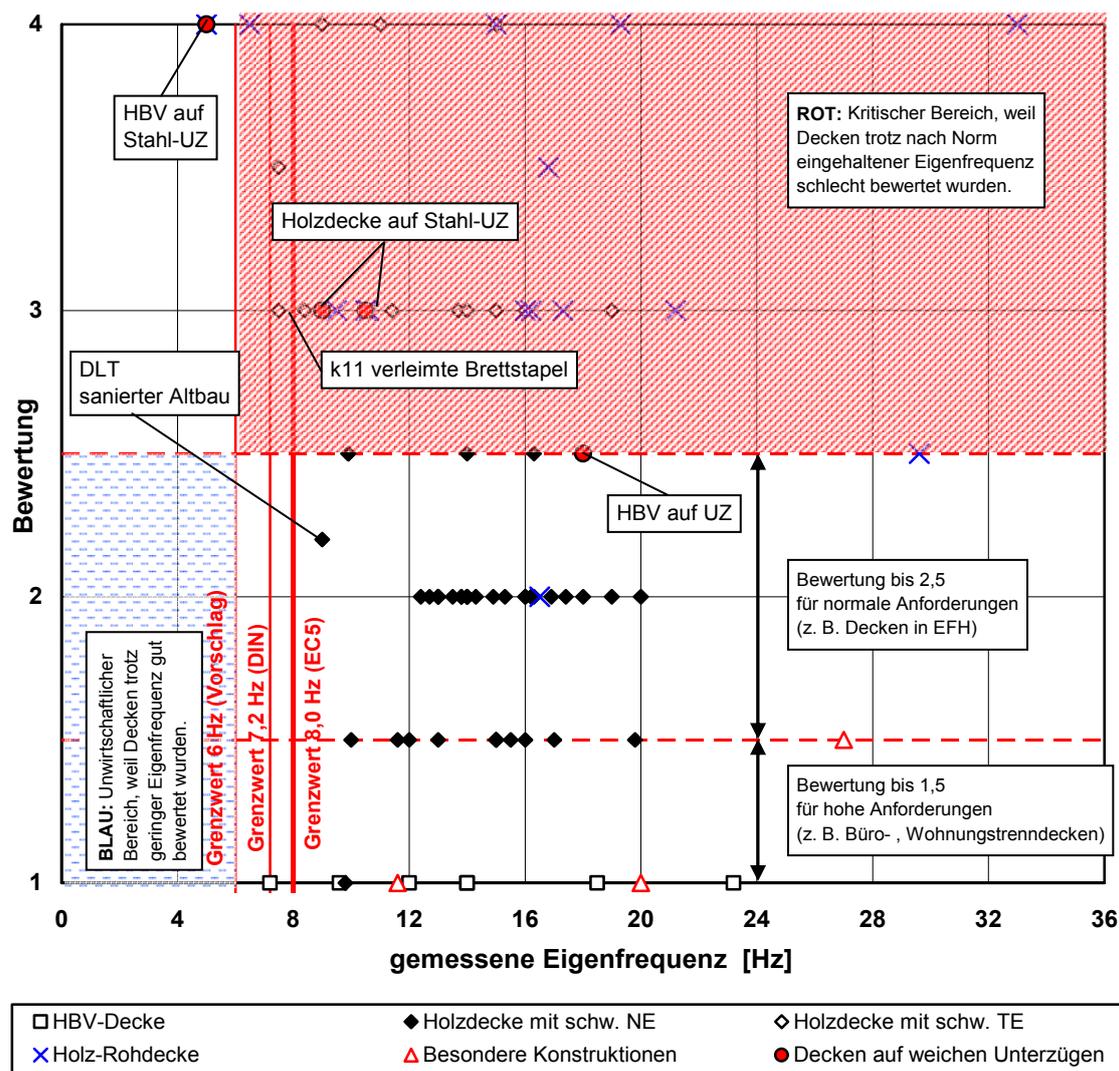


Abbildung 8-8

Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung und gemessener Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Konstruktionsart

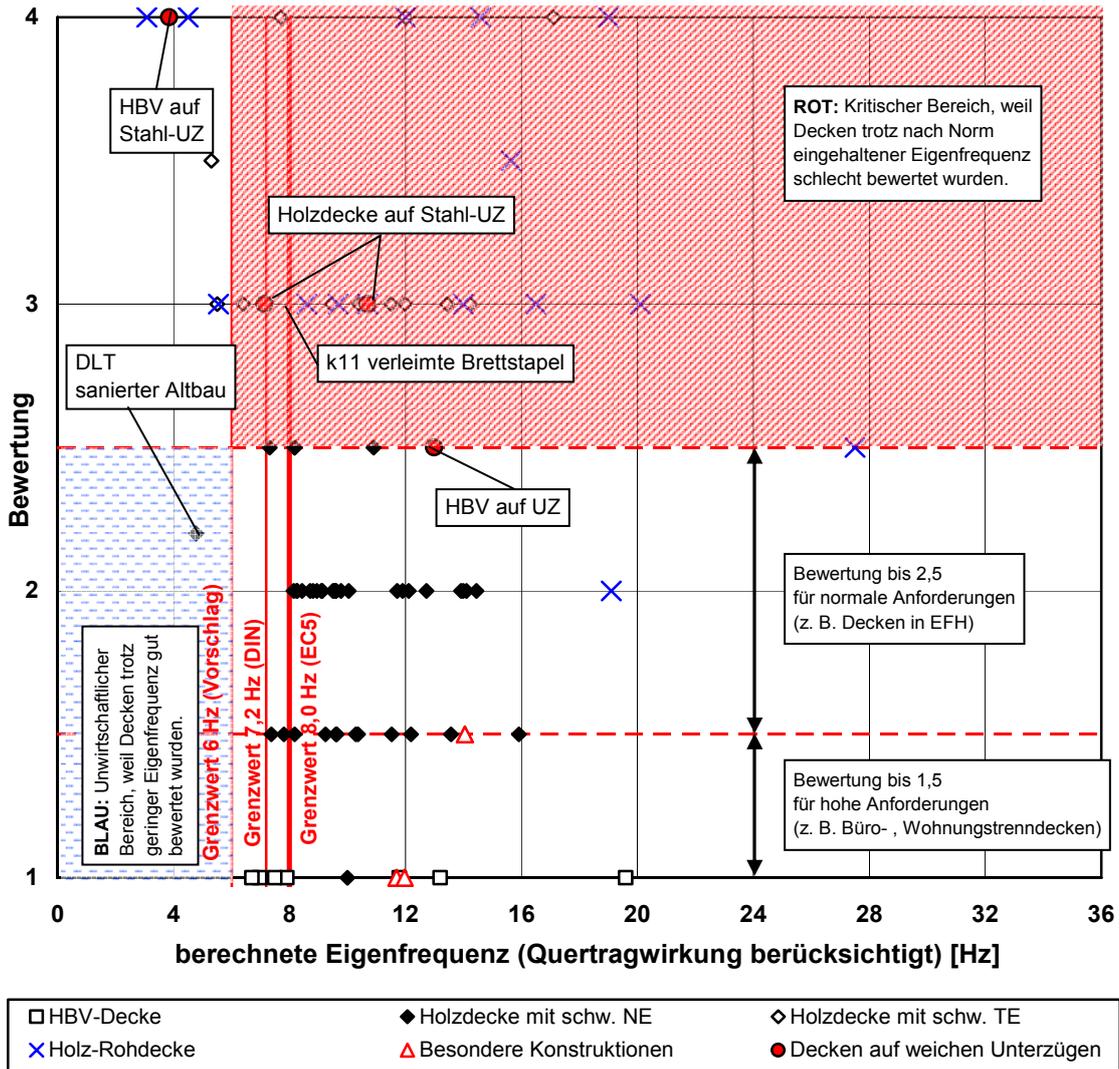


Abbildung 8-9  
 Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung und berechneter Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Konstruktionsart

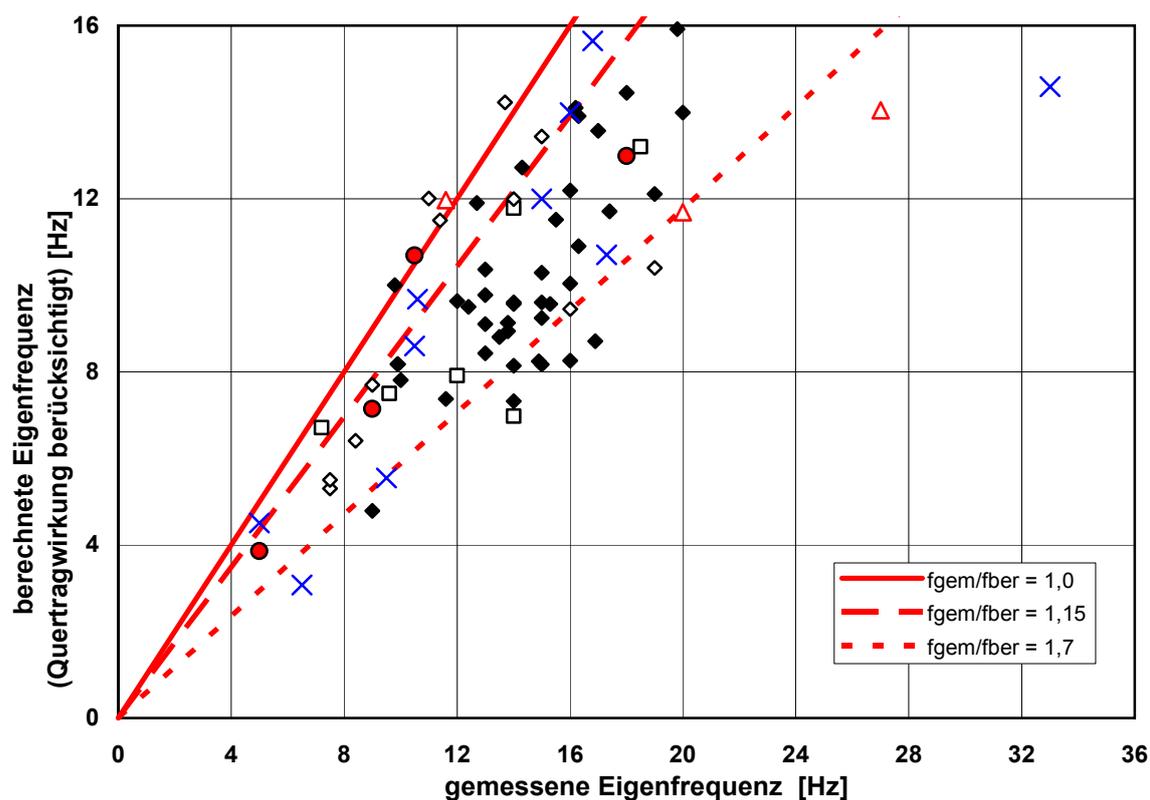


Abbildung 8-10

Vergleich zwischen berechneter und gemessener Eigenfrequenz zwischen subjektiver Bewertung und gemessener Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Konstruktionsart

In Abbildung 8-10 werden die berechneten und gemessenen Frequenzen miteinander verglichen. Die Abweichungen treten unabhängig von der Konstruktionsart auf. Folgende Ursachen kommen dafür in Betracht:

- Einfluss der Trennwände auf die Steifigkeit bzw. auf die Spannweite rechnerisch nicht berücksichtigt
- Schwankungen der Materialeigenschaften (z.B. E-Modul Holz)
- Bei den in-situ-Messungen Abweichungen der Biegesteifigkeit und der Masse auf deren Basis die Frequenz ermittelt wurde zwischen den Planungsunterlagen und der Ausführung

### Steifigkeitskriterium (Durchbiegung unter 1 kN)

In [Kreuzinger / Mohr, 1999] wurde festgestellt, dass das Steifigkeitskriterium mindestens ebenso wichtig einzustufen ist wie das Frequenzkriterium. Es weist nach den Ergebnissen aus dem ersten Auswertungsschritt mit dem "Solver" die beste Korrelation zur subjektiven Bewertung auf.

Dabei sollte die Steifigkeit der Decke so hoch sein, dass die Durchbiegung unter einer Kraft von 1kN in Feldmitte einen bestimmten Wert nicht übersteigt. Welcher Grenzwert in Gleichung 8-2 zu verwenden ist, kann vom System der Decke, von den Anforderungen des Bauherrn und der zugrunde gelegten Norm abhängen.

$$w_{stat}(1kN) \leq \text{Grenzwert} \quad \text{Gleichung 8-2}$$

Wie ist die Korrelation zwischen Bewertung und der Steifigkeit?

Welchen Einfluss haben:

- die Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Estrichs bzw.
- die anzusetzende Deckenbreite
- Verformung Unterzug wie berücksichtigen?

### Biegesteifigkeit des Estrichs

Die Durchbiegung  $w_{stat}$  infolge der Kraft  $F=1kN$  wird zunächst für einen 1m breiten Deckenstreifen ohne Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Estrichs nach Gleichung 8-3 berechnet.

$$w(1kN)_{b=1m} = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot EI_I} \quad \text{Gleichung 8-3}$$

Abbildung 8-11 zeigt den Zusammenhang zwischen Bewertung und der Durchbiegung unter 1 kN für diesen Fall.

Eine signifikant geringe Korrelation zwischen subjektiver Bewertung und den Eingangsparametern tritt bei auf Stahlunterzügen gelagerten Decken auf. Die beiden abweichenden Datenpunkte gehören zu den auf Stahlunterzügen gelagerten Decken

Für diese Fälle muss also der Einfluss der nachgiebigen Lagerung (aus Unterzugsverformung bzw. mangelnder Auflagerung) separat erfasst werden. Für die folgenden Untersuchungen werden diese Decken ausgeschlossen.

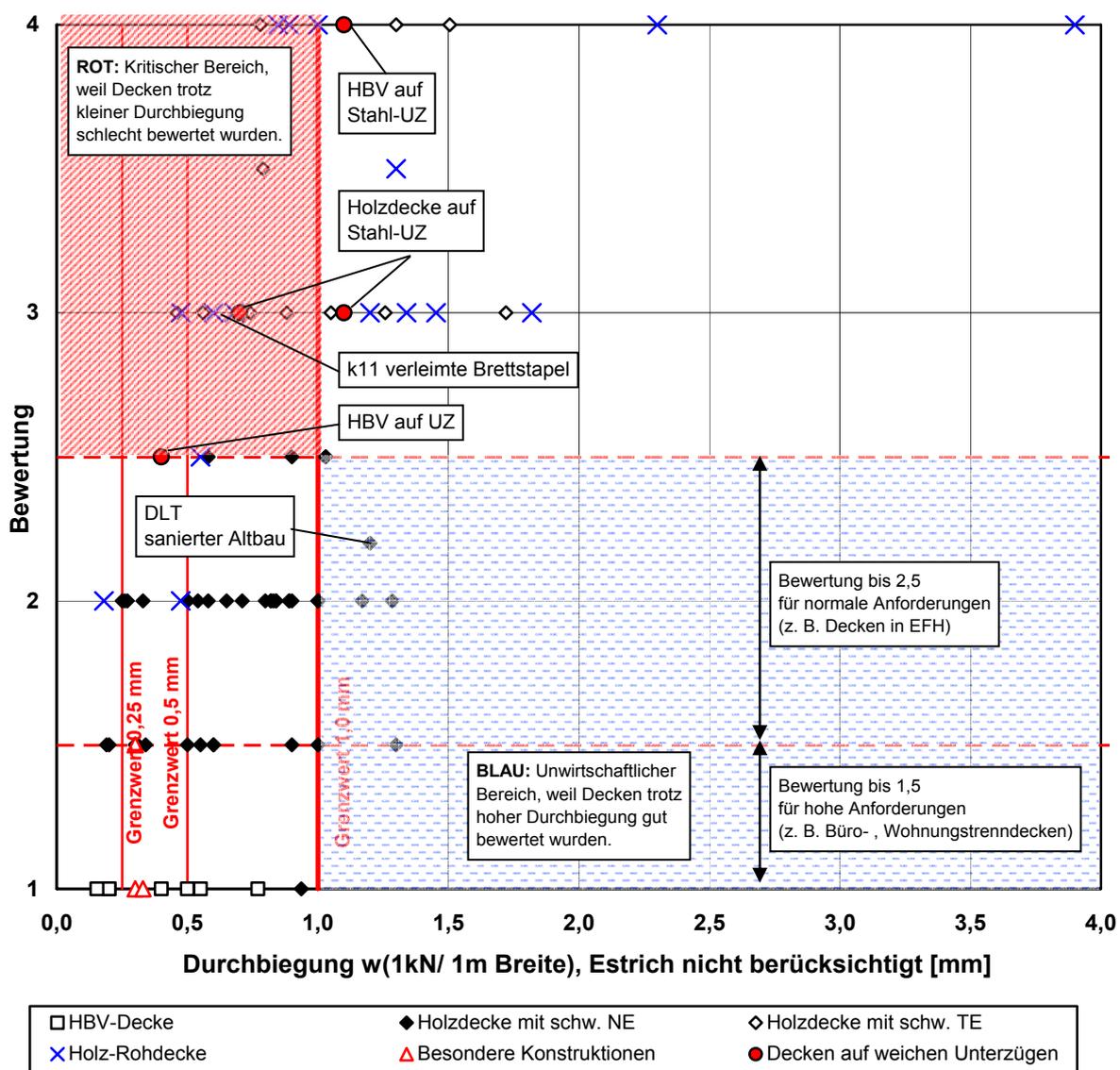


Abbildung 8-11

Zusammenhang zwischen Bewertung und Durchbiegung unter einer mittigen Einzellast von 1 kN berechnet für einen Deckenstreifen mit  $b=1\text{m}$

Für eine genauere Betrachtung wird die Biegesteifigkeit des Estrichs in Längsrichtung bei der Berechnung der Durchbiegung unter einer Einzellast von 1 kN bezogen auf einen 1m breiten Deckenstreifen berücksichtigt (vgl. Abbildung 8-12).

Infolge der Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Estrichs errechnen sich geringere Verformungen für Decken mit Estrichen. Damit kann der subjektiv gute Einfluss vor allem von steifen Nassestrichen auf das Schwingungsverhalten auch rechnerisch erfasst werden.

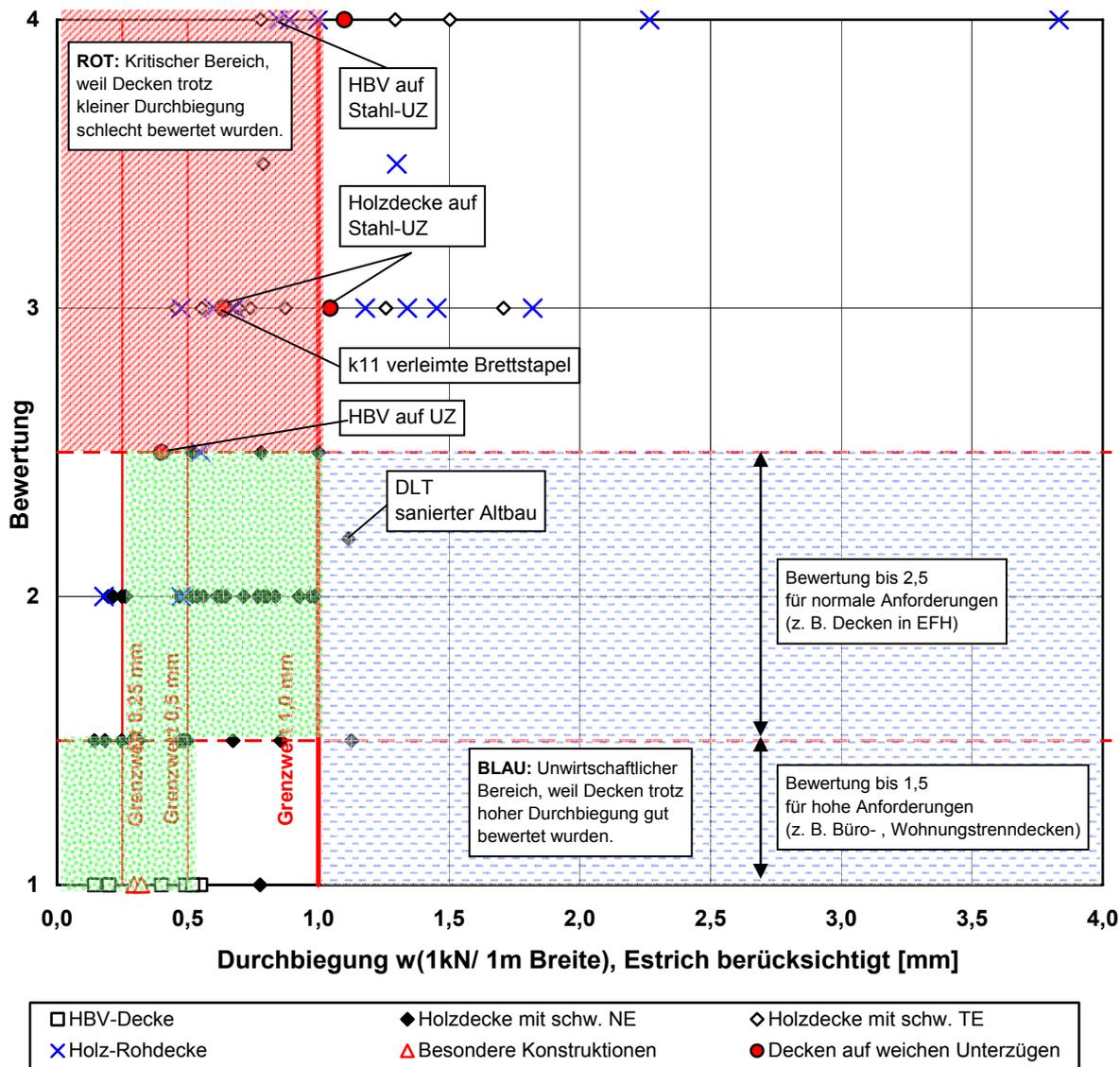


Abbildung 8-12  
 Zusammenhang zwischen Bewertung und Durchbiegung unter einer mittigen Einzellast von 1 kN berechnet für einen Deckenstreifen mit  $b=1\text{m}$  unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Estrichs

### Mitwirkende Breite

Im nächsten Schritt erfolgt die Berechnung noch genauer, indem die Verformung unter 1 kN bezogen auf die mitwirkende Deckenbreite  $b_{eff}$  nach Gleichung 8-4 aus [Kreuzinger/Mohr, 1999] und Gleichung 8-5 berechnet wird.

$$b_{eff} = \frac{l}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad \text{Gleichung 8-4}$$

$$w_{Platte} = \frac{w_{b=1m}}{b_{eff}} \quad \text{Gleichung 8-5}$$

Die mitwirkende Deckenbreite gibt an, welche Plattenbreite bzw. wie viele Balken bzw. Lamellen sich am Lastabtrag beteiligen.

Für genagelte und gedübelte Brettstapelelemente geben [Winter/Kreuzinger/Mestek, 2008] die folgende Größenordnung für die Systemsteifigkeit in Querrichtung an:

$$EI_b = 5 \cdot 10^{-4} \cdot EI_l \quad \text{Gleichung 8-6}$$

Für geklebte Brettstapelelemente wurde [DIN 1052] der folgende Zusammenhang zwischen den Systemsteifigkeiten in Quer- und Längsrichtung entnommen:

$$EI_b = 3 \cdot 10^{-2} \cdot EI_l \quad \text{Gleichung 8-7}$$

Abbildung 8-13 zeigt den Zusammenhang zwischen Bewertung und berechneter Verformung für einen Deckenstreifen mit der Biegesteifigkeit von Rohdecke und Estrich bezogen auf die Lasteinflussbreite, die vom Verhältnis zwischen Quer- und Längsbiegesteifigkeit abhängt. Diese Darstellung weist die beste Korrelation zwischen Bewertung und Durchbiegung auf.

- Für die Untersuchung mit dem "Solver" wird die Biegesteifigkeit des Estrichs in Längs- und in Querrichtung berücksichtigt.
- Die Einzellast wird auf die effektive Breite bezogen.

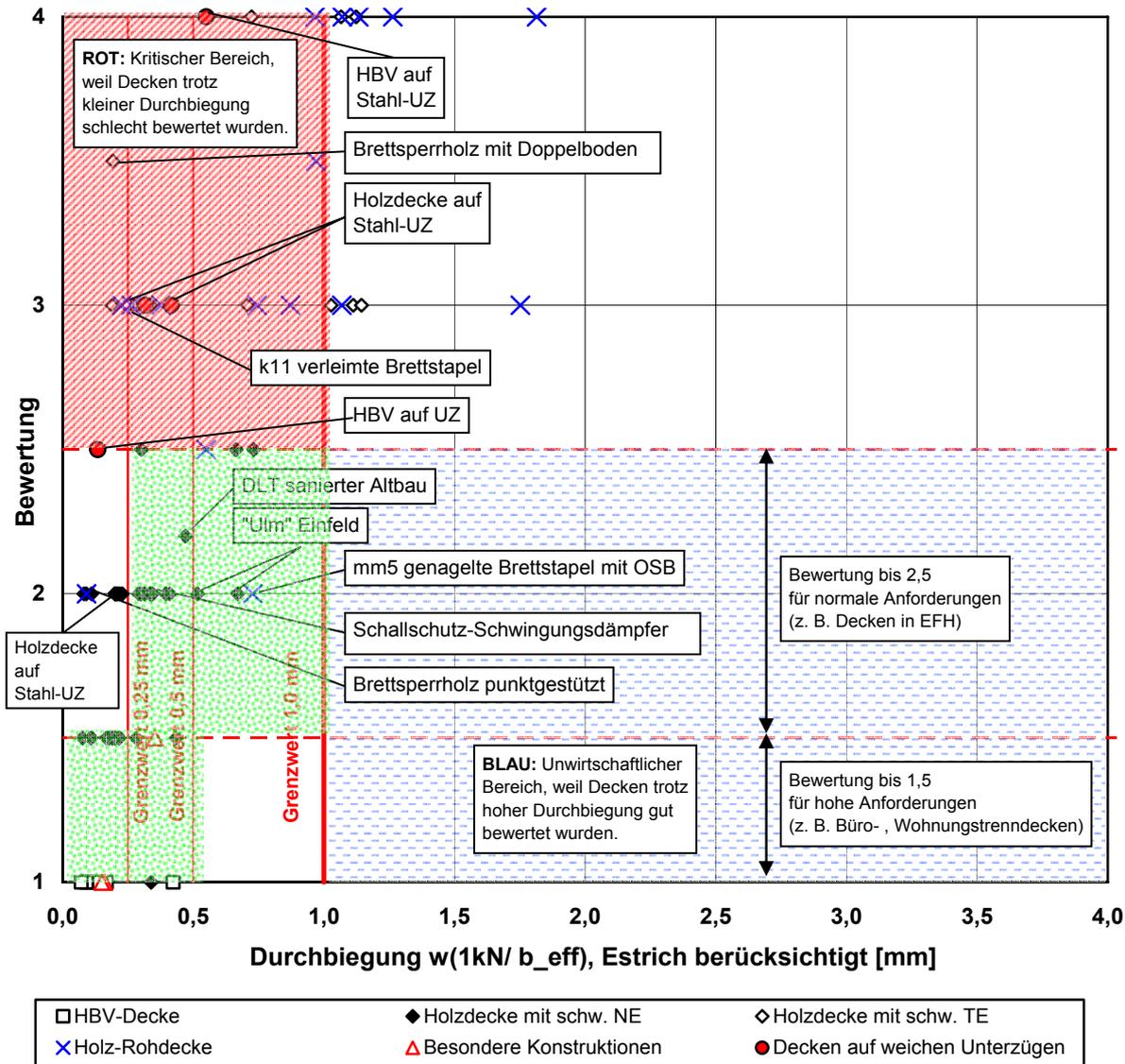


Abbildung 8-13  
 Zusammenhang zwischen Bewertung und Durchbiegung unter einer mittigen Einzellast von 1 kN berechnet für einen Deckenstreifen mit  $b_{eff}$  unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Estrichs

### Zweiachsig gespannte Decken

Bei zweiachsig gespannten Deckenplatten kann die Verformung wie für einen Trägerrost berechnet werden. In der vorliegenden Auswertung wurde die zweiachsige Tragwirkung jedoch vernachlässigt.

### 8.2.4 Ergebnisse aus dem "Solver"

#### **Rohdecken:**

Rohdecken, d.h. Decken ohne Aufbau, werden nicht weiter auf ihre Schwingungsanfälligkeit untersucht, weil sie sich überwiegend in nicht genutzten Räumen befinden und in der Regel keine Anforderungen an das Schwingungsverhalten besteht. Der Bauherr sollte aber auf eine mögliche Schwingungsanfälligkeit einer Rohdecke hingewiesen werden, weil diesen Decken sowohl Masse als auch Dämpfung fehlt.

#### **Decken mit schwimmendem Trockenestrich:**

Decken mit schwimmendem Trockenestrich können wie folgt auf ihre Schwingungsanfälligkeit untersucht werden:

Mindesteigenfrequenz von 6 Hz

Aus der Durchbiegung unter Einzellast an ungünstiger Stelle kann die Bewertung nach Gleichung 8-8 berechnet werden:

$$\frac{w(1kN)^{0,45}}{0,57} + 1 = \text{Bewertung} \qquad \text{Gleichung 8-8}$$

#### **Decken mit schwimmendem Nassestrich:**

Decken mit schwimmendem Nassestrich können wie folgt auf ihre Schwingungsanfälligkeit untersucht werden:

Mindesteigenfrequenz von 6 Hz

Aus der Durchbiegung unter Einzellast an ungünstiger Stelle kann die Bewertung nach Gleichung 8-9 berechnet werden:

$$\frac{w(1kN)^{0,10}}{0,63} + 1 = \text{Bewertung} \qquad \text{Gleichung 8-9}$$

### HBV- Decken mit schwimmendem Estrich:

HBV- Decken haben eine hohe Eigenmasse und eine hohe Steifigkeit, sowohl in Längs- als auch in Querrichtung. Durch einen schwimmenden Estrichaufbau haben sie außerdem eine ausreichend hohe Dämpfung. Deshalb genügt es, sich auf den Nachweis der Eigenfrequenz zu beschränken. Im Moment liegt der Grenzwert – mangels Erfahrung mit kleineren Frequenzen – bei 6 Hz. Eine Decke mit 4,5 Hz wurde untersucht, vgl. Messung HBV-02-roh in Anhang B .

## 8.2.5 Hinweise zur Berechnung

### Berechnung der Eigenfrequenz $f_e$ :

Bei der Berechnung der Eigenfrequenz darf mit der ständigen Einwirkung (Eigengewicht) gerechnet werden. Der quasi-ständige Verkehrslastanteil darf bei dieser weggelassen werden. Außerdem darf die Biegesteifigkeit des Estrichs berücksichtigt werden. Beispielwerte können Kapitel 9.2.5 entnommen werden.

### Berechnung der Durchbiegung unter Einzellast $w(1\text{kN})$ :

Bei der Berechnung der Durchbiegung unter Einzellast  $w(1\text{kN})$  darf die Biegesteifigkeit des Estrichs sowohl in Längs- als auch in Querrichtung berücksichtigt werden. Hierfür darf Gleichung 2-40 für die effektiv mitwirkende Breite angesetzt werden:

$$w_{stat} = \frac{F \cdot \ell^3}{48 \cdot EI_\ell \cdot b_{eff}} \quad \text{Gleichung 2-39}$$

$$\text{mit } b_{eff} = \frac{\ell}{1,1} \cdot \sqrt{\frac{EI_b}{EI_\ell}} \quad \text{Gleichung 2-40}$$

### 8.2.6 Schlussfolgerungen aus der Auswertung mit dem „Solver“ getrennt nach vier Konstruktionstypen

In der oben beschriebenen Auswertung streuen die Systemparameter stark. Es besteht nur eine unzureichende Korrelation zwischen den Systemparametern und der subjektiven Wahrnehmung des Schwingungsverhaltens.

Der Einfluss der Konstruktionsart stellt sich als wesentlich heraus. Im folgenden Abschnitt wird daher genauer differenziert nach Deckenausführung, um Aussagen zu einer zuverlässigen Prognose treffen zu können.

### 8.2.7 Auswertung nach „Parametern“

#### 8.2.7.1 Allgemeines

Idee: Unterscheidung nach Konstruktion und Aufbau der Decken, z. B.:

- Art der Deckenkonstruktion (Holz flächig oder linienförmig oder HBV)
- Fußbodenaufbau (Rohdecke / Trocken- oder Nassestrich; Flächengewicht der Schüttung, Unterhangdecke)
- Elastisch auf Unterzügen gelagert

Dann: Auswertung nach „Parametern“, z. B.:

- Frequenz (Vorschlag: mind. 6 Hz unter ständiger Last)
- Durchbiegung unter einer Einzellast, z. B.  $w(2kN)$  (unter Berücksichtigung der Steifigkeit des Estrichs)

#### 8.2.7.2 Steifigkeit und Frequenz

##### **Anmerkung zum Unterschied von flächigen und linienförmigen Konstruktionen:**

In der Auswertung (und auch bei der subjektiven Bewertung) der unterschiedlichen Deckenkonstruktionen kann die Tendenz festgestellt werden, dass flächige Holzkonstruktionen (z. B. Brettsperrholz oder Brettstapeldecken) ein besseres Schwingungsverhalten zeigen als linienförmige Holzkonstruktionen (z. B. Holzbalkendecken). Im Nachweis wird dies bei der Berechnung der Durchbiegung unter einer Einzellast über die effektiv mitwirkende Breite  $b_{ef}$  berücksichtigt.

## 8.3 Auswertung

### 8.3.1 Auswertung "Solver"

Die aus in-situ-Messungen und den Laboruntersuchungen vorhandenen Messdaten wurden ausgewertet, um Rückschlüsse auf wesentliche Parameter und ihre Grenzwerte für die Beurteilung des Schwingungsverhaltens ziehen zu können. Dafür wurden unterschiedliche Auswertemodelle auf ihre Eignung untersucht.

Auswertung / Korrelation zwischen Parametern und Bewertung  
Entscheidend sind:

- Ausbau (Masse von Schüttung und Steifigkeit Estrich)
- Verhältnis Quer- und Längssteifigkeit
- Art der Lagerung (nachgiebig oder starr)

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss dieser Parameter dargestellt und quantifiziert, wo dies möglich ist.

### 8.3.2 Einfluss der Anregung

#### 8.3.2.1 Anregung von unten → Eigenfrequenzen

Die Anregung von unten erfolgt durch einen Faustschlag von unten gegen die Decke (Abbildung 8.14). Diese Art der Anregung eignet sich sehr gut zum Anregen höherer Frequenzen oder bei leichten Decken. Der Vorteil ist, dass die anregende Person nicht auf der Decke steht und die Masse der Konstruktion erhöht, da zusätzliche Masse die Eigenfrequenzen verringert.



Abbildung 8.14: Anregung von unten durch Faustschlag

Aus dieser Anregung wurden die Eigenfrequenzen der Decke ermittelt. Dazu wurde aus dem gemessenen Beschleunigungsverlauf mittels Fast – Fourier – Transformation (FFT) ein Frequenzspektrum erzeugt. In diesem Diagramm werden damit deutlich erkennbare Maximalwerte (auch Peaks genannt) sichtbar, die die Eigenfrequenzen angeben. Dies soll in Abbildung 8.15 verdeutlicht werden.

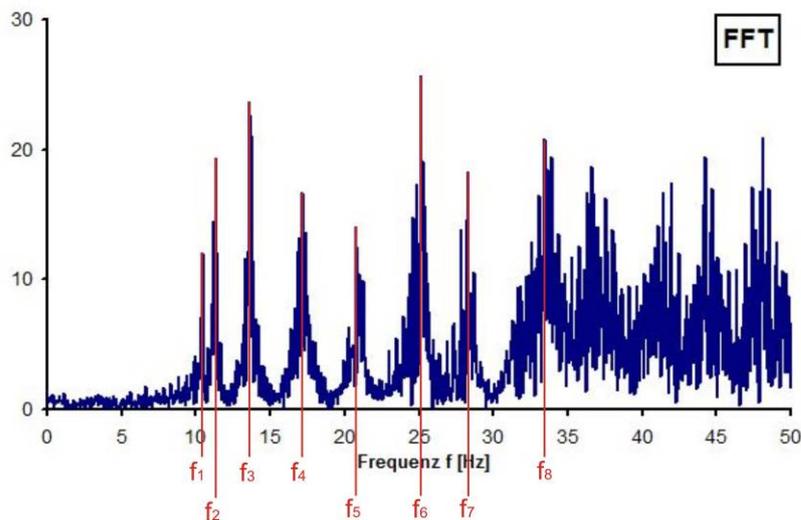


Abbildung 8.15: Frequenzauswertung Versuchsaufbau 5

Für den Versuchsaufbau mit der Bezeichnung L-SCH ergeben sich daher folgende Eigenfrequenzen:

Tabelle 8.1: Eigenfrequenzen Versuchsaufbau 5

f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8
[Hz]							
10,40	11,30	13,65	17,05	21,15	25,13	28,41	33,75

### 8.3.2.2 Heeldrop → Dämpfung

Beim **Heeldrop** - auch Fersenauftritt stellt sich die Versuchsperson auf die Zehenspitzen und lässt sich auf die Fersen fallen. Vorteil des Heeldrops ist, dass er innerhalb einer Messreihe relativ gut reproduzierbar ist. Die Größe des erzeugten Impulses kann schwanken je nach Untergrund, Schuhwerk, Masse der Versuchsperson etc. Deshalb wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens immer gleiche Schuhe verwendet.



Abbildung 8.16: anregende Person steht auf Zehenspitzen

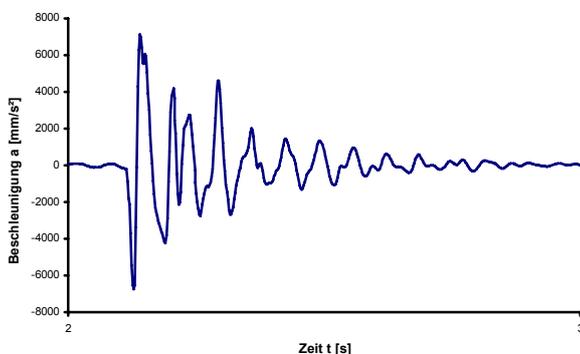


Abbildung 8.17: Beschleunigung nach Heeldrop (ungefiltert)

### 8.3.2.3 Gehen → Beschleunigung

Das Gehen wurde in zwei unterschiedliche Kategorien unterteilt. In das geregelte und das regellose Gehen. Bei beiden Varianten bewegt sich die anregende Person auf der Decke, so dass die Decke an jeder Aufnehmerposition angeregt wird. Beim regellosen Gehen wird dabei keine Schrittfrequenz festgelegt. Im Gegensatz dazu wird beim geregelten Gehen mit einem Metronom die Schrittfrequenz vorgegeben. Allerdings sind hier nur Schrittfrequenzen bis 3 Hz möglich, d.h. Erregerfrequenzen bis 6 Hz mit dem zweiten, bzw. bis 9 Hz mit dem dritten harmonischen Lastanteil.

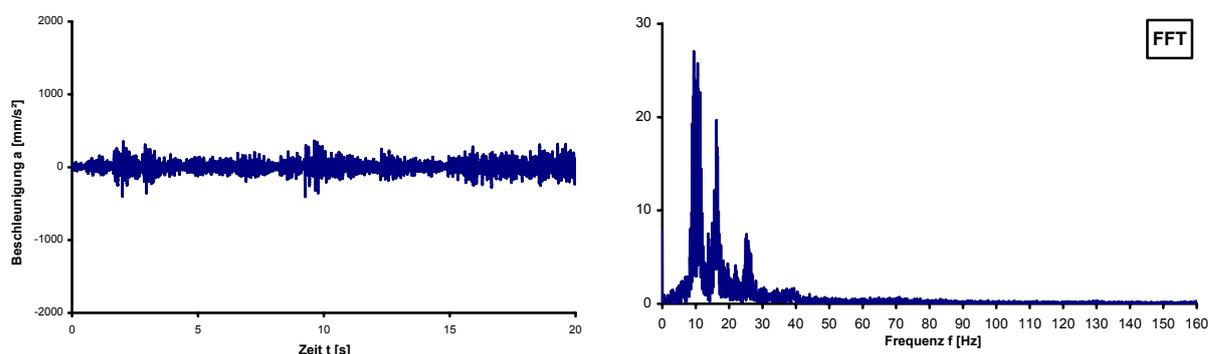


Abbildung 8.18: Beschleunigung (links) und FFT-Analyse (rechts) infolge Gehen mit 3 Hz

Abbildung 8.18 zeigt einen Messschrieb für die Anregung Gehen mit 3 Hz. Für das Forschungsvorhaben spielt die Schwingbeschleunigung infolge der Anregung durch Gehen eine große Rolle, denn es soll ermittelt werden, welchen Einfluss die Beschleunigung auf das Empfinden des Menschen hat.

### 8.3.2.4 Sandsack → Beschleunigung

Die Anregung durch das Fallenlassen eines **Sandsackes** führte nicht zu befriedigenden Ergebnissen, da das Ergebnis stark davon abhängig war, wie hoch das Eigengewicht der Decke war und wie der Sandsack auftraf.

Der Sandsack- Wurf wurde nicht mehr jedes Mal durchgeführt. V .a. bei leichten Decken führte er zu Amplituden, die außerhalb des Messbereichs liegen (Abheben). Auch bei bewohnten Objekten wirkt er auf die Nutzer sehr unangenehm. Bei schweren Decken ist er ein sehr gutes Hilfsmittel.

Es konnte keine normierte Größe geschaffen werden, da die Entfernung von Aufprallort zum Aufnehmer nicht konstant gehalten werden konnte. Ein weiterer negativer Aspekt war, dass der Sandsack nicht immer vollflächig auf die Decke fiel, sondern teilweise verkantete und somit den Impuls abfederte.

### 8.3.2.5 Schwingungserreger (Shaker)

Die Decke kann ebenso mit einem Shaker angeregt werden. An diesem Gerät kann die Frequenz eingestellt werden, die in die Decke eingebracht werden soll. Leider war es nicht möglich, dabei die Erregerkraft messen oder einstellen zu können, um Rückschlüsse auf die Schwingbeschleunigung und die Amplitude ziehen zu können.

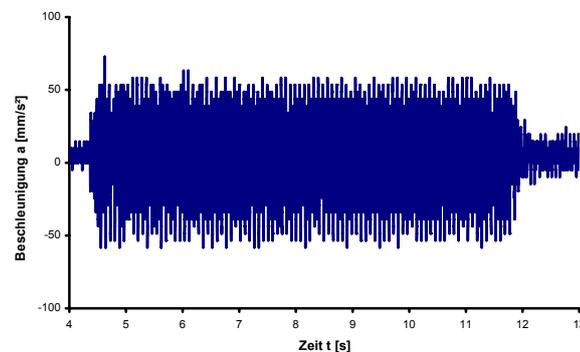


Abbildung 8.19: Shaker

Abbildung 8.20: Ein- und Ausschwingvorgang des Shakers

Der Shaker liefert eine gute Möglichkeit, die Dämpfung bei einer bestimmten Frequenz zu ermitteln. Hierfür wurde der Shaker nach dem Einschwingvorgang abgeschaltet und der Zusammenhang zwischen logarithmischem Dekrement und der Dämpfung genutzt. Diese wurde nach Gleichung 8-1) berechnet.

### 8.3.2.6 Ball und Auslenkung

Die Anregung durch einen **Ball** (mit definiertem Gewicht und Innendruck) führte zu reproduzierbaren Ergebnissen bei schweren Decken.

Bei der Anregung durch eine **Masse** wird diese an der Deckenunterseite befestigt und plötzlich gelöst, so dass die Decke einmalig ausgelenkt wieder in den Ruhezustand schwingt. Untersucht wurde die Auslenkung mit 25 kg sowie 50 kg. Die Anregung infolge des Lösens von 25 kg hat sich bewährt und führte zu reproduzierbaren Ergebnissen, ist jedoch für in-situ-Messungen nicht geeignet. Ein weiterer Vorteil dieser Anregungsart besteht darin, dass die Decke bei der Ermittlung von Eigenfrequenz und Dämpfung nicht durch eine zusätzliche Masse belastet wird.

### 8.3.3 Subjektive Bewertung

Mittelwerte der Bewertung:

Konstruktion	Mittelwert der Bewertung
HBV-Decken	1,0
NE - flächige Holzelemente	1,6
NE - linienförmig	1,9
TE - flächige Holzelemente	3,3
TE - linienförmige Holzelemente	3,3
Roh - flächige Holzelemente	2,9
Roh - linienförmige Holzelemente	3,6
Decken auf weichem UZ gelagert	3,1
Messungen mit kleinem Messgerät, Konstruktion unbekannt, normale Anforderungen (Nutzung als EFH)	2,6
Besondere Konstruktionen	2,5

### 8.3.4 Leichte Deckenkonstruktionen

Eine Vielzahl der in situ gemessenen Decken, die nach Messung den Empfehlungen nach [DIN 1052] und meistens auch denen nach [Eurocode 5] entsprechen, wird nicht als angenehm empfunden (Bewertung nach Tabelle 4-2 mit 3 oder schlechter). Das kann folgendem Bild Abbildung 8-21 entnommen werden: Es zeigt eine Zusammenstellung aller gemessenen Eigenfrequenzen (als Grenzwerte für [DIN 1052] und [Eurocode 5]) und die zugehörigen subjektiven Bewertungen. Im rot hinterlegten Bereich finden sich die Decken, die das Frequenzkriterium erfüllen, trotzdem als störend eingestuft worden sind. Das zeigt, dass die Einhaltung der Empfehlungen nach [DIN 1052] bzw. nach [Eurocode 5] alleine nicht ausreicht. Die meisten Decken, die das Frequenzkriterium erfüllen und dennoch als störend empfunden werden, sind leichte Decken mit einem kleinen Dämpfungsmaß. Beide Punkte (Masse und Dämpfung) werden im [Eurocode 5] durch einen zusätzlichen Nachweis berücksichtigt. Denn nach [Eurocode 5] sollen sowohl die erste Eigenfrequenz über 8 Hz liegen und zusätzlich der Nachweis der Schwinggeschwindigkeit eingehalten sein. Dieser Nachweis greift aber nicht, denn bei allen Decken, auch die als unangenehm empfundenen (Roh-) Decken wurde dieser Nachweis eingehalten.

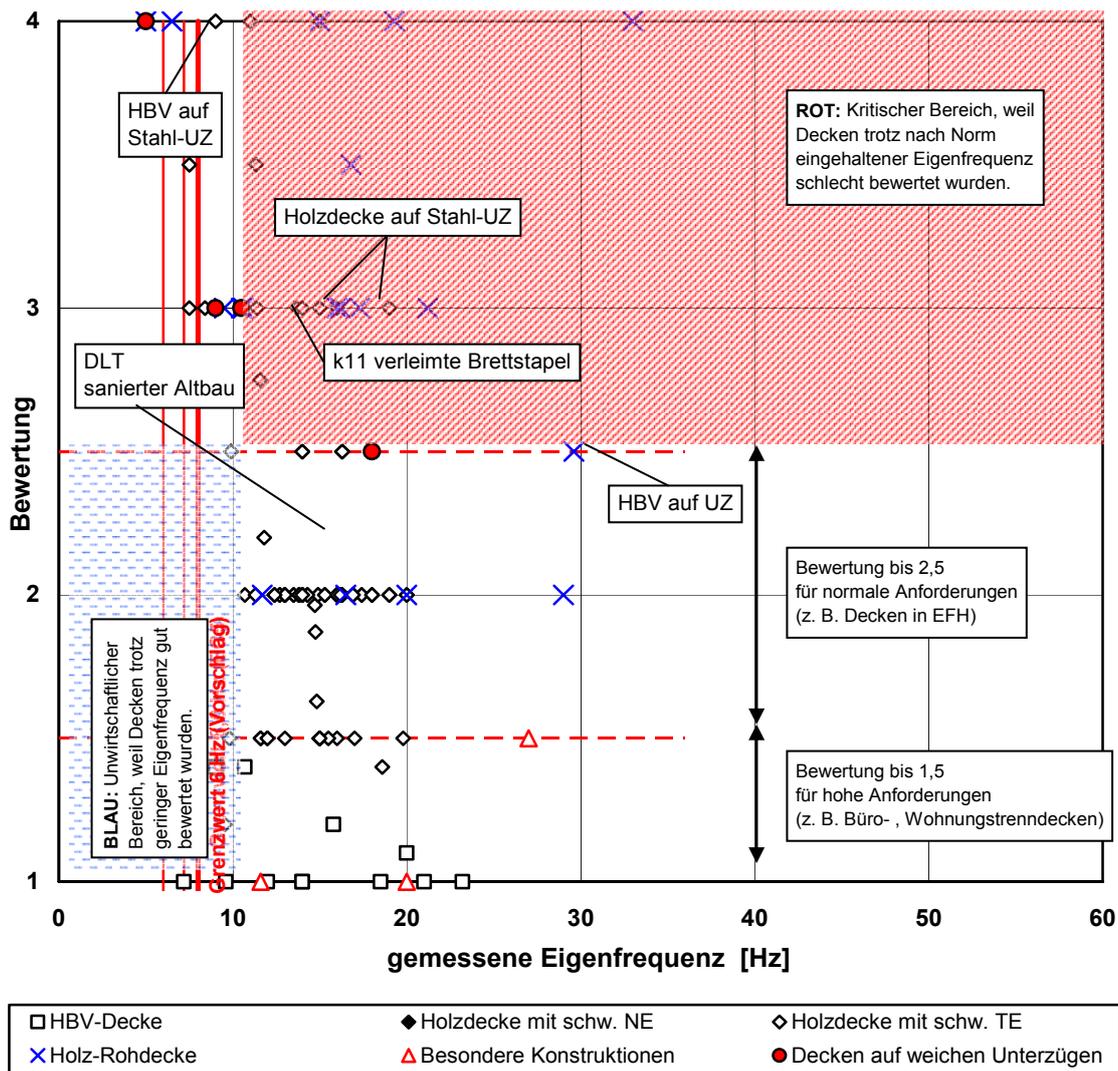


Abbildung 8-21

Zusammenstellung aller gemessenen Eigenfrequenzen und die zugehörigen subjektiven Bewertungen

### 8.3.5 Trennwände

[Maier, 2006]: S. 94

Die deckenhohen Gipskartonwände hatten den größten Einfluss auf das Schwingungsverhalten:

- Versteifung des Deckensystems in der Nähe der Trennwände → Veränderung der Eigenformen, Erhöhung der Eigenfrequenz, Erhöhung der modalen Dämpfung und Erhöhung der modalen Masse.
- Eine Berücksichtigung der Trennwände als „tote“ Masse erweist sich sowohl für den gleitenden als auch den festen Deckenanschluss als unzureichend
- Es bedarf einer expliziten Modellierung der Trennwände innerhalb von FEM-Berechnungen (Ansatz der Steifigkeit der Vertikalfedern zwischen Rohdecke und Trennwand)

### 8.3.6 Estrich / Horizontale Boden- und Deckenaufbauten / Ausbau

Diese Faktoren haben großen Einfluss auf das Schwingungsverhalten.

Evtl. müssen Installationsleitungen, die weit in den Estrich ragen bei der Ermittlung der Steifigkeit berücksichtigt werden, durch Ansatz einer reduzierten Steifigkeit. Vielleicht schneiden deshalb die Systeme ohne Schüttung schlechter ab.

[Maier, 2006]: S. 94

- Berücksichtigung als „tote“ Masse im Stahlbeton-Verbundbau ausreichend
- Modale Dämpfung gering und nicht über alle Eigenformen konsistent und damit schwer prognostizierbar (Trennwände haben den größten Einfluss)

**ACHTUNG:**

Die Biegesteifigkeit eines (Nass-) Estrichs ist im Verhältnis zur Steifigkeit einer Holzdecke wesentlich größer als gegenüber Stahl-Beton-Verbunddecken. Deshalb soll die Biegesteifigkeit des (Nass-) Estrichs bei Holzdecken auch berücksichtigt werden.

### 8.3.7 Mitschwingende Breite / beff

Abhängigkeit von Elementbreite und der Verbindung zwischen den Elementen

### 8.3.8 Tragverhalten in Querrichtung / Querbiegesteifigkeit

[Winter/ Kreuzinger/ Mestek, 2008]: S. 31:

Das Tragverhalten in Querrichtung resultiert aus den Steifigkeitseigenschaften der Verbindungsart, vgl. Gleichung 9-19:

Brettstapel, genagelt: näherungsweise  $EI_{\text{quer}} = 0,0005 EI_{\text{längs}}$

Brettstapel, gedübelt wie Brettstapel, genagelt

Brettstapel geklebt:  $EI_{\text{quer}} = 0,03 EI_{\text{längs}}$  (aus Verhältnis  $E_{\text{quer}} / E_{\text{längs}}$ )

### 8.3.9 Mitschwingende Masse / Fläche / Raumgröße

Vorsicht bei Fluren, weil hier häufig sehr geringe mitschwingende Masse / Fläche.

Frequenz ist zwar hoch durch seitliche Tragwirkung bzw. geringe Spannweite, dennoch schlechtes Schwingungsverhalten (evtl. schwingt hier nur Estrich mit).

### 8.3.10 Einflüsse aus der Randeinspannung

Im Großen Deckenversuchsstand wurde der Einfluss der Randeinspannung infolge einer Auflast aus den aufgehenden Wänden abgebildet. Das subjektive Empfinden des Schwingungsverhaltens verbesserte sich. Bei den gemessenen Eigenfrequenzen wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

### 8.3.11 Einflüsse auf die Eigenfrequenz aus nachgiebiger Lagerung / seitlicher Lagerung

#### Beispiele aus in-situ-Messungen zu Einfeld mit Kragarm:

B-02-NE-sch und L-02/1-NE-sch

Das statische System ist ein Einfeldträger mit Kragarm, dynamisch eher Zweifeldträger, d.h. wenn die Eigenfrequenz für einen entsprechenden Zweifeldträger berechnet wird, dann passen berechnete und gemessene Eigenfrequenz zusammen.

#### Beispiele aus in-situ-Messungen zur seitlichen Lagerung:

L-10/1-NE

Es wurden zwei gleiche Dreifeldträger gemessen, jedes Mal mit Trennwänden, jedoch einmal weit entfernte seitliche Lagerung (A2), einmal nahe seitliche Lager (Gang) (A5): Die Unterschiede in der gemessenen Frequenz sind bei 13,8 Hz bzw. 18 Hz.

#### **Beispiele aus in-situ-Messungen zur elastischen Zwischenlagerungen:**

L-10/1-NE

Es wurden zwei Zweifeldträger gemessen, die Zwischenlager einmal als Stahlträger (A1), einmal als Wand (A4) und folgende Unterschiede in der Eigenfrequenz: 12,7 Hz bzw. 14,3 Hz, und in der Dämpfung 3% bzw. 5,5% festgestellt.

L-15/1-NE

Es wurden zwei sonst gleiche Systeme, einmal mit Lagerung auf Unterzug (Stahlträger), einmal mit Lagerung auf einer Wand (ohne Unterzug) gemessen und folgende Unterschiede in der Eigenfrequenz festgestellt: 13,0 Hz bzw. 16,9 Hz.

### **8.3.12 Dämpfung:**

#### **8.3.12.1 Auswertung im Forschungsvorhaben**

Für die Auswertung der Schwingungen nach einem Heeldrop wurde festgelegt, dass die Dämpfung über zehn Perioden ermittelt werden soll. Zunächst wurde jedoch ein bestimmter Frequenzbereich herausgefiltert, um die Dämpfung für die erste Eigenfrequenz ermitteln zu können. Mit dem Programm [DIAdem] wurde dann eine Hüllkurve der gefilterten Beschleunigung erzeugt. Daher konnte auf relativ einfache Weise eine Routine erstellt werden, um die Dämpfung zu ermitteln. In Abbildung 8.22 wird dies an einem Beispiel erläutert.

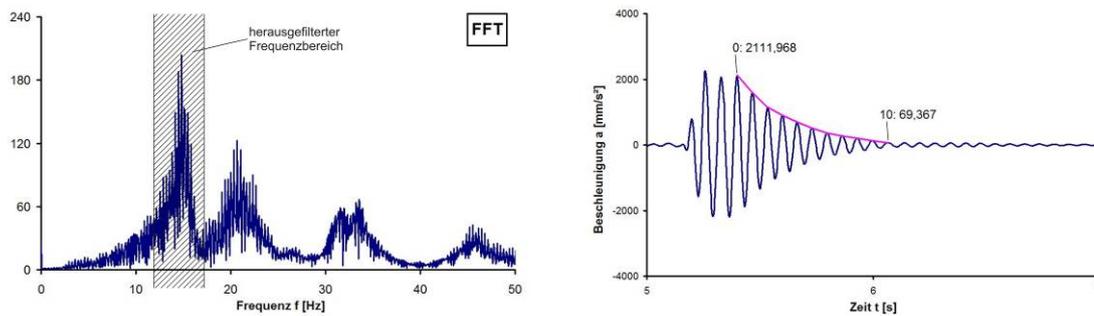


Abbildung 8.22: Frequenzbereich (links) und gefilterte Beschleunigung (rechts)

Wie in Abbildung 8.22 zu sehen ist, wurden nur die Frequenzen um die erste Eigenfrequenz verwendet. Alle anderen wurden herausgefiltert. Das Ergebnis ist ein „geglätteter“ Beschleunigungs – Zeitschrieb, wie rechts zu sehen ist. Danach wurde mit dem maximalen Beschleunigungswert  $a_0$  und dem, zehn Perioden später  $a_{10}$ , die Dämpfung nach folgender Formel berechnet:

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{n} \cdot \ln\left(\frac{a_n}{a_0}\right) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{10} \cdot \ln\left(\frac{2111,968}{69,367}\right) = 0,0543 = 5,43\% \quad (8.1)$$

### 8.3.12.2 Dämpfung Holzbalkendecke (Großer Deckenversuchsstand)

Bei den in-situ- und Labor-Messungen war jeweils eine Versuchsperson auf der Decke, deren Dämpfungsanteil in die Ergebnisse einfließt. Dies ist für die hier behandelten personeninduzierten Schwingungen realitätsnah und wird im Weiteren verwendet.

Tabelle 8-2 gibt einen Überblick über die im Großen Deckenversuchsstand ermittelten Mittelwerte von Dämpfungen der Holzbalkendecke. Deutlich werden die großen Unterschiede, die sich aus den untersuchten Fußbodenaufbauten und Auflagerungen nicht erklären lassen. Im Großen Deckenversuchsstand wurde das Hauptaugenmerk auf die Untersuchung der Einflüsse auf das Quertragverhältnis und die Eigenfrequenzen gelegt. Dabei wurden sehr viele Parameter, die die Dämpfung beeinflussen variiert. Infolgedessen lassen sich die im Großen Deckenversuchsstand ermittelten Dämpfungsanteile nicht für die einzelnen Randbedingungen ermitteln.

Tabelle 8-2 Dämpfungswerte für unterschiedliche Aufbauten und Lagerungen der Holzbalkendecke (großer Deckenversuchsstand)

Bezeichnung	Beschreibung	Bewertung	Schüttung	NE	TE	Unterhangdecke	Teppich	vierseitig	zweiseitig	Randschalung	DLT / Randeinsp	Lagerung auf Holz	Lagerung auf Elastomer	f1 gemessen	D1
														[Hz]	[%]
L-0_Elast	Rohdecke auf Elastomerlager	3	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X	14,60	4,52
L-0_Elast+Holz	Rohdecke mit unteren Schwellhölzern auf Elastormerlager	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	X	17,50	-
L-0_Holz1	Rohdecke mit unteren Schwellhölzern auf Rollenlager	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	18,40	-
L-0_Holz2	Rohdecke mit Schwellhölzern oben und unten auf Rollenlager	4	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	15,20	3,59
L-SCH	Rohdecke mit 6cm Splitt	-	X	-	-	-	-	-	X	X	-	X	-	10,50	-
L-TES	TE auf TSD und Schüttung, 2-seitig gelagert	2	X	-	X	-	-	-	X	X	-	X	-	10,30	2,99
L-TES_4seitig	TE auf TSD und Schüttung, 4-seitig gelagert	2	X	-	X	-	-	X	-	X	-	X	-	10,10	3,47
L-TES_UF	TE auf TSD und Schüttung mit Unterhangdecke an Federschiene, 2-seitig gelagert	2	X	-	X	X	-	-	X	X	-	X	-	9,60	3,16
L-TES_UL	TE auf TSD und Schüttung mit Unterhangdecke an Sparschalung, 2-seitig gelagert	2	X	-	X	X	-	-	X	X	-	X	-	10,30	2,15
L-TES_UL_Teppich	TE auf TSD und Schüttung mit Unterhangdecke an Sparschalung, 2-seitig gelagert, mit Teppichauflage	2	X	-	X	X	X	-	X	X	-	X	-	10,30	2,39
L-NES_UL	NE auf TSD und Schüttung mit Unterhangdecke an Sparschalung, 2-seitig gelagert	1	X	X	-	X	-	-	X	X	-	X	-	9,70	2,85
L-NES	NE auf TSD und Schüttung, 2-seitig gelagert	1,2	X	X	-	-	-	-	X	X	-	X	-	9,60	2,91
L-NES_Teppich	NE auf TSD und Schüttung, 2-seitig gelagert, mit Teppichauflage	1	X	X	-	-	x	-	X	X	-	X	-	9,80	3,16
L-NES_4seitig	NE auf TSD und Schüttung, 2-seitig gelagert	1	X	X	-	-	-	X	-	X	-	X	-	10,40	4,57
L-NES_Randeinsp_0	Randeinspannung ohne Last, NE auf TSD und Schüttung, 2-seitig gelagert	1	X	X	-	-	-	-	X	X	R	X	-	9,70	5,38
L-NES_Randeinsp_36	Randeinspannung Last=36kN/m, NE auf TSD und Schüttung, 2-seitig gelagert	2	X	X	-	-	-	-	X	X	R	X	-	11,80	3,09
L-0_Randeinsp_0	Randeinspannung ohne Last, Rohdecke, 2-seitig	-	-	-	-	-	-	-	X	X	R	X	-	0,00	4,22
L-0_Randeinsp_20,4	Randeinspannung Last=20,4kN/m Rohdecke, 2-seitig,	-	-	-	-	-	-	-	X	X	R	X	-	0,00	5,53

### 8.3.12.3 Dämpfung infolge von Ausbaukonstruktionen (Abschnitt 6.4)

Die Auswertung der Versuche zeigt die Vorteilhaftigkeit von Nassestrich gegenüber einem Trockenestrich. Infolge der auch im Vergleich mit einer Holzdecke hohen Steifigkeit erhöht der Nassestrich die Gesamtbiegesteifigkeit der Decke und kompensiert damit die durch die Erhöhung der Gesamtdeckenmasse reduzierte Eigenfrequenz.

Eine weitere Möglichkeit, das Schwingungsverhalten einer Decke positiv zu beeinflussen, besteht im Anordnen einer Unterhangdecke. Wenn dabei der Schallschutz nur eine untergeordnete Rolle spielt, sollte zur Befestigung der Gipskartonplatten auch Sparschalung verwendet werden, da dieser Aufbau gleich nach dem Nassestrich die besten Ergebnisse erzielte. Auch in der Bewertung des Schwingungsverhaltens von Decken im Großen Deckenversuchsstand wurde der Aufbau mit Unterhangdecke an Lattung als angenehmer empfunden als der Aufbau mit federnd gelagerter Unterhangdecke.

### 8.3.12.4 Dämpfung Holzbalken aus Abschnitt 6.8

Der Einfluss der Lagerung wurde an Holzbalken untersucht, die wahlweise auf Stahl, Holz und Elastomer gelagert wurden (Abschnitt 6.8). Die Lagerung auf Elastomer wies dabei deutlich höhere Dämpfungswerte auf als die Lagerung auf Stahl oder Holz, siehe Abbildung 8-23.

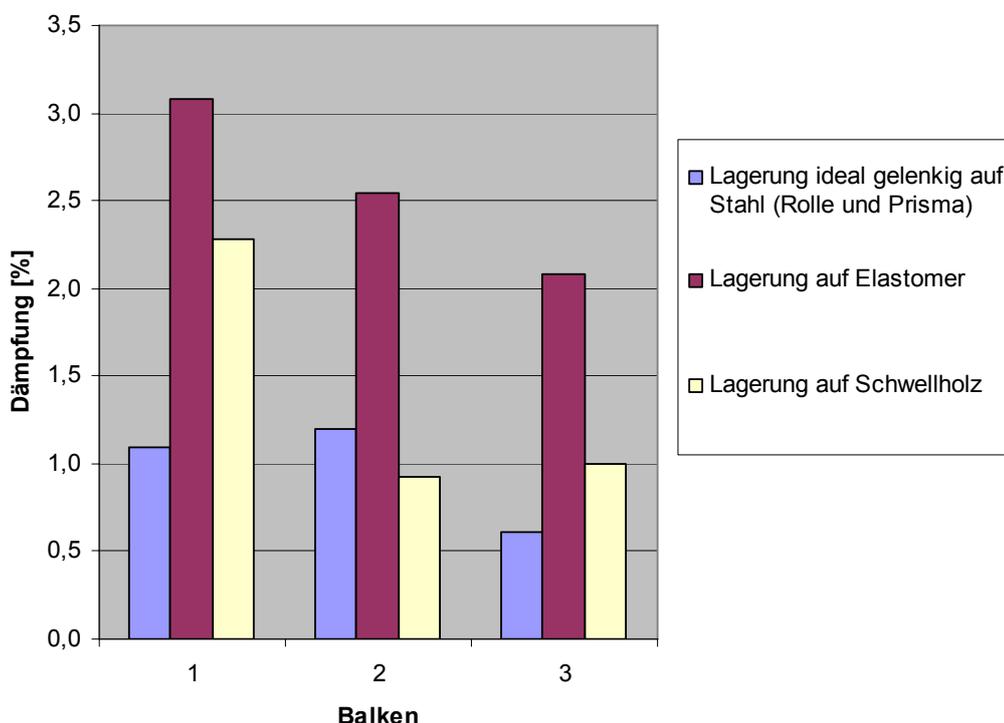


Abbildung 8-23

Zusammenstellung des Einflusses der Lagerung auf die Dämpfung

### **8.3.12.5 Dämpfungswerte über Verlustfaktor**

Um das Dämpfungsvermögen von einzelnen Materialien miteinander vergleichen zu können, wurden die Versuche zur dynamischen Steifigkeit (Abschnitt 6.4) durchgeführt. Die ermittelten Werte stimmen mit denen in der Literatur überein, können jedoch nicht mit den Ergebnissen aus dem Großen Deckenversuchsstand abgeglichen werden, da hier die Materialien nur in Kombination eingebaut wurden.

Die Untersuchung ermöglicht jedoch einen Vergleich der Materialien, vgl. Tabelle 6-12. Hier weist die Gummigranulatmatte, auch als Elastomer-Lager bezeichnet, den mit Abstand höchsten Dämpfungsgrad auf.

### **8.3.12.6 Dämpfungswerte in-situ-Messungen**

#### **B-02-NE-sch**

Dämpfung nach Sprungversuch ist höher als nach Heeldrop.

ca. 3,5% bei Sprung zu 1,5-2% bei Heeldrop mit Geschwindigkeit = 8mm/s

#### **L-10/1-NE**

Es wurden zwei gleiche Zweifeldträger gemessen, einmal mit Lagerung auf Stahlträger (A1), einmal mit Lagerung auf Wand (A4) und folgende Unterschiede in der Frequenz 12,7 Hz bzw. 14,3 Hz und der Dämpfung 3% bzw. 5,5% festgestellt.

### 8.3.12.7 Dämpfungswerte Literatur

Tabelle 8-3 gibt Dämpfungswerte für unterschiedliche Holzdecken aus der Literatur an. Weitere Werte sind in Anhang A zusammengestellt.

Tabelle 8-3 Dämpfungswerte für unterschiedliche Holzdecken

Material und Aufbau	Lehr'sches Dämpfungsmaß $D$	Quelle
(Holz-) Decken ohne schwimmenden Estrich	1,0 %	[Erläuterungen]
Decken aus verleimten Brettstapelelementen mit schwimmendem Estrich	2,0 %	
Holzbalkendecken und mechanisch verbundene Brettstapeldecken mit schwimmendem Estrich	3,0 %	
Brettsperrholzdecken ohne bzw. mit leichtem Aufbau, zweiseitig gelagert	2,5 %	[Fitz, 2008] und [Hamm/Richter -BSP, 2009]
Brettsperrholzdecken mit schwimmendem Estrich (schwerer Aufbau) auf Stahl oder punktförmig oder zweiseitig gelagert	2,5 %	
Brettsperrholzdecken mit schwimmendem Estrich, vierseitig gelagert	3,5 %	
Brettsperrholzdecken mit schwimmendem Estrich, vierseitig auf Holzwänden gelagert	4,0 %	

## 8.4 Neue Erkenntnisse bzw. Thesen

- **Frequenzermittlung**
  - mit Steifigkeit (Nass-) Estrich
  - mit Drillsteifigkeit für flächige Holzelemente
  - ohne Verkehrslastanteil
  
- **Steifigkeitskriterium**
  - mit Steifigkeit Nass- (Estrich)
  - mit  $b_{eff}$  für einachsig gespannte Decken
  - bei zweiachsig gespannten Decken als Trägerrost
  - unter 2 kN
  - am Ersatzsystem eines Einfeldträgers berechnet wird
  
- **Konstruktion / Aufbau berücksichtigt wird.**

## 8.5 Zusammenfassung

Qualitative Klassifizierung des Einflusses der untersuchten Parameter auf die modalen Systemgrößen und die subjektive Bewertung zeigt Tabelle 8-4. in Anlehnung an [Maier, 2006].

Tabelle 8-4 Einfluss der untersuchten Elemente auf das Schwingungsverhalten von Decken

Element	Einfluss auf:				
	Eigenform	Eigenfrequenz	Masse	Dämpfung	Subjektive Bewertung
Steifigkeit Estrich (Rohdichte, Dicke, E-Modul)					
Schwimmender Estrich	-	+		?	++
GK-Trennwände	++	+		++	++
Unterhangdecke					
Randeinspannung				+	+

Einfluss: ++ sehr groß + groß o mittel - klein -- nicht vorhanden

Die aus in-situ-Messungen und den Laboruntersuchungen vorhandenen Messdaten werden ausgewertet, um Rückschlüsse auf wesentliche Parameter und ihre Grenzwerte für die Beurteilung des Schwingungsverhaltens ziehen zu können. Dafür werden unterschiedliche Auswertemodelle auf ihre Eignung untersucht.

Auswertung → Korrelation zwischen Parametern und Bewertung

Entscheidend sind:

- Ausbau (Masse von Schüttung und Steifigkeit Estrich)
- Verhältnis Quer- und Längssteifigkeit
- Art der Lagerung (nachgiebig oder starr)

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss dieser Parameter dargestellt und quantifiziert, wo dies möglich ist.

Tabelle 8-5 Einfluss der untersuchten Elemente auf das Schwingungsverhalten von Decken, verbal

Maßnahme	+	-
Rahmenkonstruktionen und DLT	Steifigkeit und Eigenfrequenz werden erhöht	Schwingungsübertragung in vertikale Bauteile und evtl. in andere Geschosse bzw. in andere Räume
Unterzüge	Evtl. zus. Dämpfung, höhere Eigenfrequenz durch zusätzliches Auflager	Nachgiebiges Auflager, geringere Eigenfrequenz, Achtung bei Auflagerung Holzbalken in I-Träger
Leichte Trennwände	Evtl. zus. Dämpfung, Erhöhung Steifigkeit Gesamtsystem und der modalen Masse	Schwingungsübertragung in vertikale Bauteile und evtl. in andere Geschosse
Zusätzliche Masse	Geringere Schwingungsamplitude, evtl. zus. Dämpfung	Geringere Eigenfrequenz, Anregung in Resonanz eher möglich
Sehr leichte Decke	Hohe Eigenfrequenz	Vibrationen eher spürbar (trotz erfolgreichem Nachweis)
Schwimmender Estrich	Wirkt dämpfend, federt den Impuls ab	

## 9 Konstruktions- und Bemessungsregeln

### 9.1 Allgemeines

Deckenschwingungen werden vom Nutzer auch aufgrund seines persönlichen Verhältnisses zum Bauwerk und zur Aktivität unterschiedlich bewertet. Der Unterschied hängt davon ab, ob sich der Empfänger in einem engen Bezug zum Anreger (z.B. Zuschauer oder Aktiver mit sportlicher Betätigung) befindet oder sich durch den Anreger eher gestört fühlt (z.B. Nachbars Kinder) [Kreuzinger/ Mohr, 1999].

Aus diesem Grund werden die Anforderungen an die dynamischen Eigenschaften einer Decke in Abhängigkeit von ihrer Nutzung festgelegt. In Tabelle 9-1 werden drei Kategorien vorgeschlagen und mit Kriterien aufgeführt. Die Nutzung und die Anforderungen an das Schwingungsverhalten sollten auf dieser Basis verbindlich vom Planer mit dem Bauherren vereinbart werden.

Aktuell findet auf Grund der Forschungsergebnisse in der Fachwelt eine Meinungsbildung über die Definition von Decken-Schwingverhaltensklassen statt, die klare, einfache Bauvertragsregelungen ermöglichen wollen bzw. sollen.

### 9.2 Vorschläge von Bemessungs- und Konstruktionsregeln mit Anwendungsgrenzen für Wohnungs- und Bürodecken

In Auswertung der Untersuchungen und der Literatur zeigten sich drei wesentliche Parameter, mit denen sich das Schwingungsverhalten der Decken abschätzen lässt:

- Frequenzkriterium
- Steifigkeitskriterium
- Konstruktive Ausbildung

Auf der Basis der Zuordnung zwischen subjektiver Bewertung und den Systemkenngrößen wurde der in Abbildung 9-1 dargestellte Bemessungsablauf entwickelt und über die vorliegende Datenbasis verifiziert.

Die Decken im Versuchsstand würden nach dem Vorschlag schlechter bewertet werden, als sie subjektiv empfunden wurden. Das bedeutet, dass sich die Qualität, die unter Laborbedingungen möglich ist, sich nicht in der Praxis realisieren lässt. Deshalb ist hier ein Sicherheitsabstand sinnvoll, da realitätsnah.

Tabelle 9-1 zeigt eine Zusammenfassung der vorgeschlagenen Bemessungs- und Konstruktionsregeln, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erarbeitet wurden.

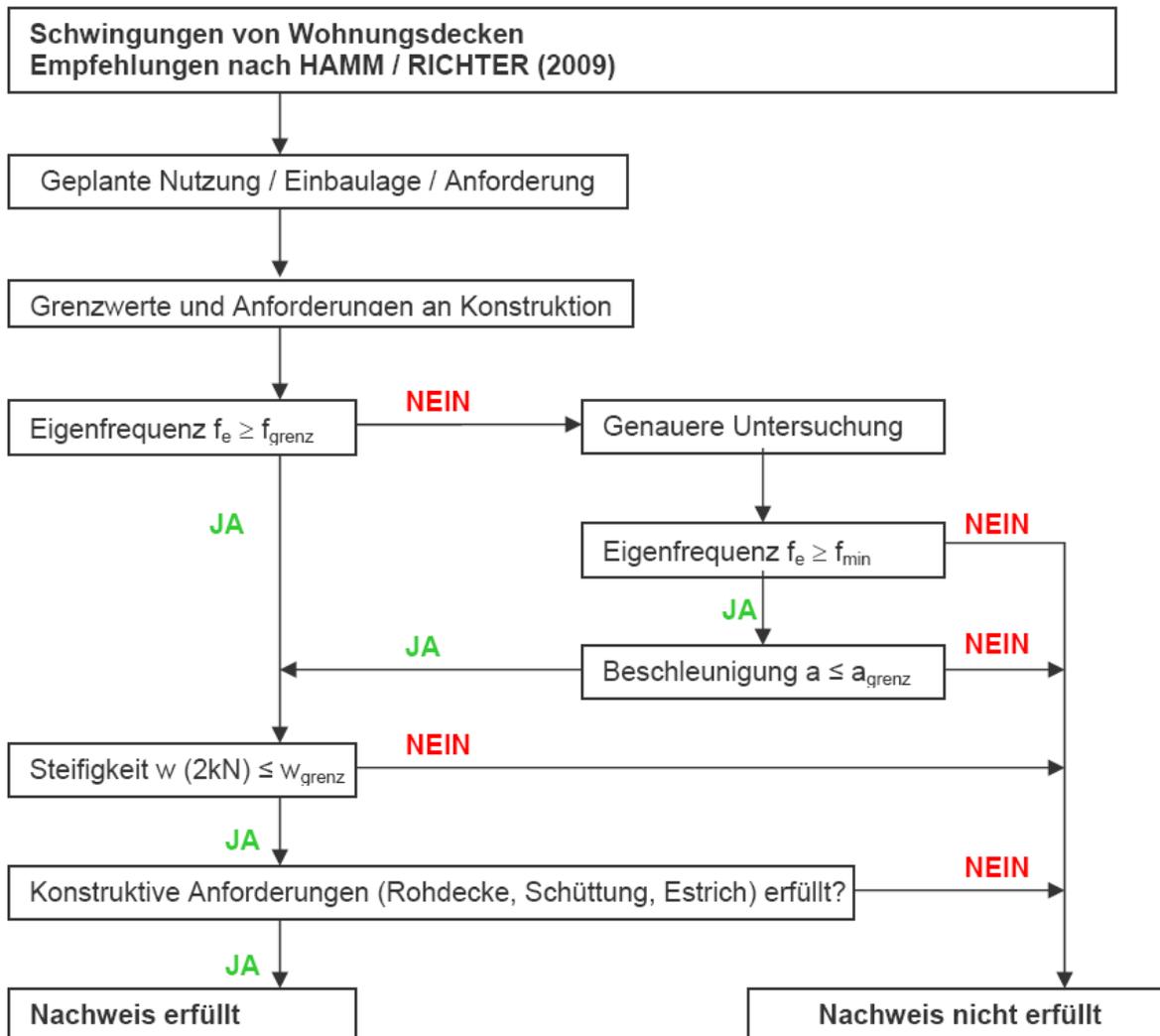


Abbildung 9-1  
Vorschlag für den Ablauf des Schwingungsnachweises im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Tabelle 9-1 Zusammenhang zwischen subjektiven Bewertungen und Nutzung bzw. Einbaulage

Einbaulage	Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten	Decken innerhalb einer Nutzungseinheit	Keine Anforderungen an das Schwingungsverhalten
Bewertung	(Bewertung 1,0 bis 1,5)	(Bewertung 1,5 bis 2,5)	(Bewertung 2,5 bis 4,0)
Im Rahmen des Vorhabens untersuchte Raumnutzung bzw.	z.B. Flure mit kurzen Spannweiten z.B. für Nutzungen als Wohnungstrenndecken in Mehrfamilienhäusern, Decken in Büros mit PC-Nutzung oder Besprechungsräumen	z.B. Decken in üblichen Einfamilienhäusern, Decken im Bestand, oder mit Zustimmung des Bauherren	z.B. Decken unter nicht genutzten Räumen oder nicht ausgebauten Dachräumen
Beschreibung der Empfindungen des Schwingungsverhaltens	Schwingungen werden gar nicht oder nur gering spürbar, wenn man sich darauf konzentriert und nicht als störend empfunden.	Schwingungen werden als spürbar, jedoch nicht als störend empfunden.	Schwingungen werden als spürbar bis deutlich spürbar, unangenehm und auch teilweise störend empfunden.
Frequenzkriterium $f_e \geq f_{grenz}$	$f_{grenz} = 8 \text{ Hz}$	$f_{grenz} = 6 \text{ Hz}$	-
Steifigkeitskriterium $w(2kN) \leq w_{grenz}$	$w_{grenz} = 0,5 \text{ mm}$	$w_{grenz} = 1,0 \text{ mm}$	-
Genauere Untersuchung nur, wenn $f_e < f_{grenz}$	$f_{min} \leq f_e < f_{grenz}$ mit $f_{min} = 4,5 \text{ Hz}$ und $a_{grenz} = 0,05 \text{ m/s}^2$	$f_{min} \leq f_e < f_{grenz}$ mit $f_{min} = 4,5 \text{ Hz}$ und $a_{grenz} = 0,10 \text{ m/s}^2$	-
Konstruktive Anforderungen	Anordnung von schwimmendem Nass- oder Trockenestrich auf Schüttung nach Tabelle 9-2 und Abschnitt 9.2.1		-

### 9.2.1 Konstruktive Anforderungen

Prinzipiell sind schwimmende Nassestriche aufgrund ihrer höheren Masse und Steifigkeit besser geeignet als Trockenestriche.

Eine (möglichst schwere) Schüttung verbessert das Schwingungsverhalten ebenfalls. Gleichzeitig bietet sie die Möglichkeit der Installationsführung. Je schwerer die Schüttung, desto größer die Verbesserung der subjektiven Bewertung. Als „schwere“ Schüttung werden Schüttungen mit einem Flächengewicht von mindestens 60 kg/m<sup>2</sup> bezeichnet. Dies entspricht z.B. einer 4 cm dicken Kalksplittschicht.

In Tabelle 9-2 sind die Mindestanforderungen an den Deckenaufbau in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Schwingungsverhalten zusammengestellt. Die rechnerischen Anforderungen aus Tabelle 9-1 sind selbstverständlich zusätzlich einzuhalten.

Tabelle 9-2 Konstruktive Maßnahmen in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Schwingungsverhalten

	Art des Estrichs	Decken zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten (Bewertung 1,0 bis 1,5)	Decken innerhalb einer Nutzungseinheit (Bewertung 1,5 bis 2,5)
Holz-Beton-Verbunddecken		Bereits alle in situ gemessenen Rohdecken (außer der nachgiebig gelagerten) wurden mit 1,0 bis 1,5 bewertet. Sie wiesen alle ein hohes Flächengewicht von mind. 300 kg/m <sup>2</sup> auf.	Bereits alle in situ gemessenen Rohdecken (außer der nachgiebig gelagerten) wurden mit 1,0 bis 1,5 bewertet.
Flächige Massivholzdecken (z.B. Brettsperrholz- und Brettstapeldecken)	schwimmender Nassestrich	schwimmend auf schwerer oder leichter Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	schwimmend auf schwerer Schüttung *)	schwimmend auf schwerer Schüttung *)
Holzbalkendecken oder Trägerroste	schwimmender Nassestrich	schwimmend auf schwerer Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	Alle untersuchten Ausführungsbeispiele wurden mit 2,0 und schlechter bewertet. Ausführung ist wahrscheinlich nicht möglich.	schwimmend auf schwerer Schüttung

\*) Als Beispiel für Trockenestrichaufbau, der die Bewertung 1,5 erfüllt, wurde nur eine BSP-Decke im Labor gemessen. Die Übertragbarkeit auf in-situ-Decken ist noch nicht geklärt.

### 9.2.2 Frequenzkriterium

Die Eigenfrequenz der Decke unter ständigen Einwirkungen soll so hoch gewählt werden, dass Resonanz aus Gehen vermieden wird, Gleichung 3-4. Die Grenzwerte sind abhängig von der Einbaulage bzw. den Anforderungen an die Decke, vgl. Gleichung 9-1 und Gleichung 9-2.

$$f_e \geq f_{\text{grenz}} \quad \text{Gleichung 3-4}$$

$$f_{\text{grenz}} = 8 \text{ Hz} \text{ für Bewertung 1,0 bis 1,5} \quad \text{Gleichung 9-1}$$

$$f_{\text{grenz}} = 6 \text{ Hz} \text{ für Bewertung 1,5 bis 2,5} \quad \text{Gleichung 9-2}$$

Die Eigenfrequenz kann durch Messung oder Berechnung ermittelt werden. Dabei darf berücksichtigt werden:

- die Biegesteifigkeit des Estrichs (Achtung bei Installationsführungen oder Fertigteilen oder Fugen im Estrich sind Reduzierungen der Estrich-Biegesteifigkeit zu berücksichtigen),
- Vierseitige Lagerung und ggf. die Drillsteifigkeit  $EI_D$  sowie die
- Durchlaufwirkung.

Liegt die Decke nachgiebig auf Unterzügen auf, so ist dies bei der Berechnung der Eigenfrequenz zu berücksichtigen, indem der Nachweis für das gesamte Deckensystem einschließlich Unterzügen geführt wird [Hamm, 2008].

Die Durchlaufwirkung darf berücksichtigt werden (z.B. mit Hilfe von Tabelle 9/3 aus den [Erläuterungen] oder mit geeigneter Software). Eine Berechnung am Ersatzsystem eines gelenkig gelagerten Einfeldträgers mit der Spannweite gleich der größten Feldlänge (unter Vernachlässigung der Durchlaufwirkung) liegt auf der sicheren Seite.

Für die Masse  $m$  wird nur vom Eigengewicht der Decke und anderen ständigen Einwirkungen ausgegangen. Der Trennwandzuschlag und die Verkehrslast werden nicht mit angesetzt.

Für Einfeldträger, z. B. für eine Holzbalkendecke, kann die Ermittlung der Eigenfrequenz nach Gleichung 9-2 und Abbildung 9-2 erfolgen.

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 \cdot \ell^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} = f_{\text{Balken}} \quad \text{Gleichung 9-3}$$

$$\text{mit } I = \frac{b_{\text{Balken}} \cdot h^3}{12} \quad \text{Gleichung 9-4}$$

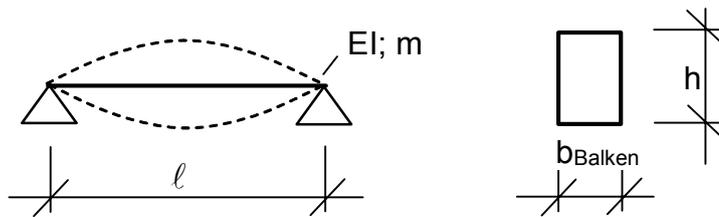


Abbildung 9-2 Einfeldträger: Schwingungen in der ersten Eigenfrequenz und Querschnitt

Für die drillweiche orthotrope Platte mit gelenkiger vierseitiger Lagerung, z. B. BSP- Platten oder Brettstapel mit zweiachsiger Spannrichtung gilt folgende Gleichung für die Eigenfrequenz. Dabei wird eine ausreichende Verbindung der einzelnen Plattenelemente vorausgesetzt.

$$f_{\text{Platte}} = f_{\text{Balken}} \cdot \sqrt{1 + 1/\alpha^4} \quad \text{Gleichung 9-5}$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{b}{l} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_{\ell}}{EI_b}} \quad \text{Gleichung 9-6}$$

$b$  ist die Spannweite in Querrichtung oder Deckenbreite

$EI_{\text{längs}}$  ist die effektive Biegesteifigkeit in Längsrichtung je Meter Breite

$EI_{\text{quer}}$  ist die effektive Biegesteifigkeit in Querrichtung je Meter mit

$$(EI)_{\text{längs}} > (EI)_{\text{quer}}$$

### 9.2.3 Genauere Untersuchung

Vor allem bei Decken mit großen Spannweiten wird die Forderung nach einer Grenzfrequenz bemessungsrelevant. Es können auch Decken mit Eigenfrequenzen kleiner als die Grenzfrequenz ausgeführt werden, wenn die Schwingbeschleunigung nach Gleichung 9-9 begrenzt wird und eine Mindestfrequenz nach Gleichung 9-10 eingehalten wird.

Der Nachweis der Schwingbeschleunigung führt in der Regel nur bei ausreichend schweren Decken (hauptsächlich großflächigen Holz-Beton-Verbunddecken) zum Erfolg.

$$f_{\min} \leq f_e < f_{\text{grenz}} \quad \text{Gleichung 9-7}$$

$$f_{\min} = 4,5 \text{ Hz} \quad \text{Gleichung 9-8}$$

$$a \leq a_{\text{grenz}} \quad \text{Gleichung 9-9}$$

$$a_{\text{grenz}} = 0,05 \text{ m/s}^2 \text{ für Bewertung 1,0 bis 1,5} \quad \text{Gleichung 9-10}$$

$$a_{\text{grenz}} = 0,10 \text{ m/s}^2 \text{ für Bewertung 1,5 bis 2,5} \quad \text{Gleichung 9-11}$$

Die Messwerte der Beschleunigung streuen stark und sollten dem Nachweis nicht zugrunde gelegt werden, da noch keine definierte Einwirkung gefunden wurde, die für alle Deckentypen zu reproduzierbaren Messergebnissen führt. Die Beschleunigung infolge einer gehenden Person kann nach Gleichung 9-12 berechnet werden. Die anzusetzende dynamische Kraft ist abhängig von der Eigenfrequenz der Decke (vgl. Abbildung 2-11). Die Kräfte der harmonischen Anteile in Abbildung 9-3 sind vereinfachend für eine Schrittfrequenz von  $2\text{Hz} \pm 0,5\text{Hz}$  aufgetragen. Falls die Eigenfrequenz im Bereich der Streuung der zweiten oder dritten Harmonischen liegt, kann die Beschleunigung für ein einachsig oder zweiachsig gespanntes Deckenfeld als Einfeldträger mit der (Raum-) Breite  $b$  infolge einer gehenden Person wie folgt berechnet werden:

$$a \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = \frac{F_{\text{dyn}}}{M \cdot 2D} = \frac{0,4 \cdot F(t) [\text{N}]}{m [\text{kg} / \text{m}^2] \cdot 0,5\ell [\text{m}] \cdot 0,5b [\text{m}] \cdot 2D} \quad \text{Gleichung 9-12}$$

Die Dämpfung  $D$ , auch bezeichnet als Lehr'sches Dämpfungsmaß, kann den [Erläuterungen] Kapitel 8, oder Anhang A entnommen werden. Für die Ermittlung der Dämpfungswerte war jeweils eine Versuchsperson auf der Decke, deren Dämpfungsanteil in die Ergebnisse einfließt. Die mitschwingende Masse für Durchlaufträger darf z.B. nach Tabelle 9/4 aus den [Erläuterungen] berechnet werden. Bei Querbiegesteifigkeiten aus flächigen Massivholzdecken oder Aufbauten mit Nassestrich und Raumabmessungen mit  $b \leq 1,5 \cdot \ell$  kann für  $b$  die Raumbreite eingesetzt werden.  $0,5b$  ist dann die mitschwingende Breite des Deckenfeldes.

$$F_{\text{dyn}} = 0,4 \cdot F(t) \quad \text{Gleichung 9-13}$$

Die einwirkende zeit- und ortveränderliche Kraft  $F_{dyn}$  wird mit 40 % der Kraft  $F(t)$  (nach Gleichung 9-13 und Abbildung 9-3) angesetzt. Der Faktor 0,4 berücksichtigt die wechselnde Einwirkungsstelle und die Tatsache, dass die Einwirkungsdauer begrenzt ist (Abbildung 2-12) und der eingeschwingene Zustand meist nicht ganz erreicht wird, vgl. [Kreuzinger/ Mohr, 1999].

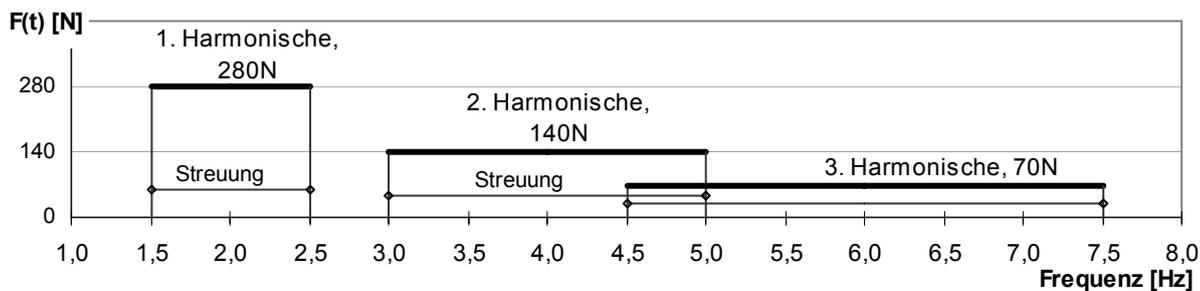


Abbildung 9-3 Zusammenhang zwischen der Frequenz und der abgegebenen Kraft beim Gehen

### 9.2.4 Steifigkeitskriterium

Die Bedeutung des Steifigkeitskriteriums wurde schon mehrfach betont. Die Untersuchungen ergaben folgende Randbedingungen und Parameter für das Steifigkeitskriterium. Abweichend zu den meisten anderen Literaturstellen wird hier mit einer Einzellast von 2 kN am **Ersatzsystem des gelenkig gelagerten Einfeldträgers** gerechnet. Welcher Grenzwert in Gleichung 9-14 verwendet wird, hängt von den Anforderungen ab.

$$w(2 \text{ kN}) \leq w_{\text{grenz}} \quad \text{Gleichung 9-14}$$

$$w_{\text{grenz}} = 0,5 \text{ mm} \text{ für Bewertung 1,0 bis 1,5} \quad \text{Gleichung 9-15}$$

$$w_{\text{grenz}} = 1,0 \text{ mm} \text{ für Bewertung 1,5 bis 2,5} \quad \text{Gleichung 9-16}$$

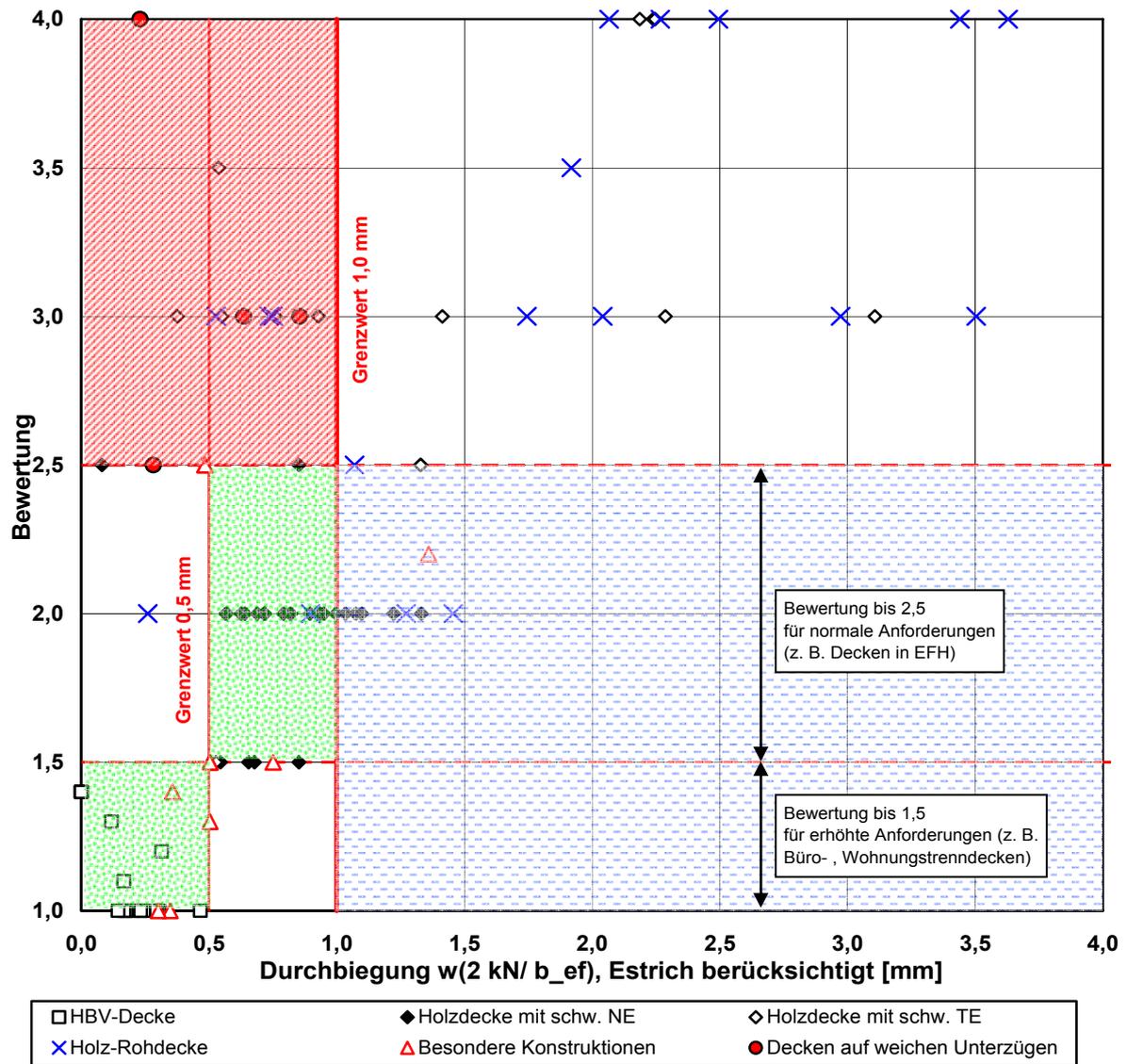


Abbildung 9-4

Zusammenhang zwischen der Durchbiegung  $w(2\text{ kN})$  und der Bewertung bei den untersuchten Decken

Die Durchbiegung  $w(2\text{ kN})$  infolge der Kraft  $F = 2\text{ kN}$  wird für einachsige gespannte Platten bezogen auf einen Deckenstreifen mit der Breite  $b_{w(2\text{ kN})}$  nach Gleichung 9-17 am Einfeldträger ermittelt. Die Angemessenheit der Breite für die Mannlast ist durch den Planer mit Blick auf die tatsächliche Konstruktion zu überprüfen. Zweiachsig gespannte Platten können als Trägerrost berechnet werden.

Bei Durchlaufträgern darf die Durchlaufwirkung **nicht** berücksichtigt werden. Hier erfolgt der Nachweis am Ersatzsystem eines beidseitig gelenkig gelagerten Einfeldträgers mit der Spannweite des größten Feldes.

$$b_{w(2\text{ kN})} = \min \left\{ \begin{array}{l} b_{ef} \\ \text{Raumbreite} \end{array} \right\} \quad \text{Gleichung 9-17}$$

$$\text{mit } b_{ef} = \frac{\ell}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_{\text{quer}}}{EI_{\text{längs}}}} = \frac{b}{1,1 \cdot \alpha} \quad \text{mit } \alpha \text{ nach Gleichung 9-6} \quad \text{Gleichung 9-18}$$

Die **Längsbiegesteifigkeit** darf aus der Summe der Biegesteifigkeit der Rohdecke und der Biegesteifigkeit des Estrichs ohne Steinersche Anteile ermittelt werden.

Die **Querbiegesteifigkeit** darf aus der Summe der Querbiegesteifigkeit der Rohdecke und der Biegesteifigkeit des Estrichs ohne Verbundwirkung (ohne Steinersche Anteile) ermittelt werden. Bei Installationsführungen oder Fugen im Estrich oder Ausführung als Fertigteil mit Fugen ist die Biegesteifigkeit des Estrichs entsprechend zu reduzieren. Nicht kraftschlüssig ausgeführte Stöße zwischen Elementen bzw. Fertigteilen müssen bei der Ermittlung der Querbiegesteifigkeit der Rohdecke oder der anzusetzenden Raumbreite berücksichtigt werden.

Liegt die Decke nachgiebig auf Unterzügen auf, so ist bei der Berechnung der Durchbiegung unter der Einzellast  $F$  die Durchbiegung der Unterzüge zusätzlich zu berücksichtigen. D.h. die Summe der Durchbiegungen muss die Grenzwerte einhalten.

Die gute Korrelation des Kriteriums mit der Bewertung – in Abhängigkeit vom Konstruktionstyp zeigt Abbildung 9-4.

### 9.2.5 Ermittlung der Querbiegesteifigkeit für Steifigkeits- und Frequenzkriterium

Das Tragverhalten der Decke in Querrichtung resultiert bei flächigen Holzplatten aus den Steifigkeitseigenschaften der Verbindung zwischen den Lamellen. [Winter/ Kreuzinger/ Mestek, 2008] geben die folgenden Beziehungen zwischen den Biegesteifigkeiten in Querrichtung  $EI_{\text{quer}}$  und Längsrichtung  $EI_{\text{längs}}$  an:

$$\text{Brettstapel, genagelt oder gedübelt: näherungsweise} \quad EI_{\text{quer}} = 0,0005 EI_{\text{längs}} \quad \text{Gleichung 9-19}$$

$$\text{Brettstapel geklebt:} \quad EI_{\text{quer}} = 0,03 EI_{\text{längs}} \quad \text{Gleichung 9-20}$$

Der Berechnung zugrunde gelegte E-Moduln:

Zementestrich: 25.000 N/mm<sup>2</sup>

Calciumsulfat / Anhydrit: 14.000 N/mm<sup>2</sup>

Gussasphalt: 10.000 N/mm<sup>2</sup>

OSB, Spanplatte: 5.000 N/mm<sup>2</sup>

## 9.3 Anwendungsgrenzen und Hinweise zum Bemessungsvorschlag

### 9.3.1 Lagerung auf nachgiebigem Unterzug

Liegt die Decke nachgiebig auf Unterzügen auf, so ist bei der Berechnung der Eigenfrequenz und der Durchbiegung unter der Einzellast  $F_k$  die Durchbiegung der Unterzüge zusätzlich zu berücksichtigen. D.h. die Summe der Durchbiegungen muss die Grenzwerte einhalten. Ein ausführlicher Beitrag zur Berücksichtigung der Lagerung auf Unterzügen findet sich in [Hamm, 2008].

#### 9.3.1.1 Berücksichtigung der Nachgiebigkeit von Unterzügen sowohl bei der Berechnung der Eigenfrequenz $f_e$ als auch bei der Berechnung der Durchbiegung unter Einzellast

Wird die Decke auf Unterzügen gelagert, so ist die Nachgiebigkeit der Unterzüge zu berücksichtigen. Haupt- und Nebenträger sind dann nicht mehr getrennt zu betrachten, sondern als ein kombiniertes System

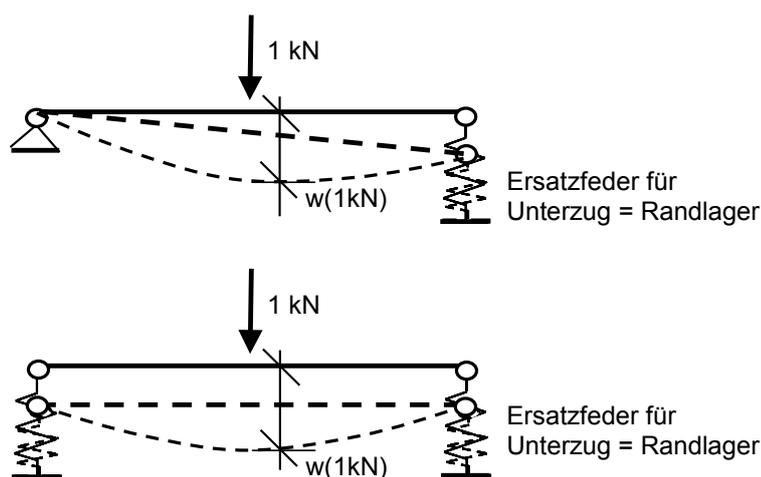


Abbildung 9-5  
Ersatzsystem für nachgiebig gelagerte Decken

Beim Einfeldträger entspricht eine Frequenz von 8 Hz einer Durchbiegung von 5 mm und eine Frequenz von 6,0 Hz einer Durchbiegung von 9 mm.

Die Gesamt-Verformung der Decke in Feldmitte unter ständiger Einwirkung sollte kleiner sein als die der angestrebten Frequenz entsprechende Durchbiegung.

Wird die Decke zweidimensional abgebildet und mit FEM gerechnet, kann die Gesamtverformung abgelesen werden, oder noch besser, gleich die Eigenfrequenz berechnet werden:

Die Eigenfrequenz des Gesamtsystems unter charakteristischer ständiger Einwirkung soll größer sein als  $f_{grenz}$  .nach Gleichung 3-4 ff.

### 9.3.1.2 Statisches und dynamisches Ersatzsystem:

Soll auf die zweidimensionale Berechnung verzichtet werden, können die folgenden Hilfssysteme und Gleichungen verwendet werden. Die Ersatzsysteme aufgrund der Auflagerung auf einem Unterzug können wie in Abbildung 9-6 dargestellt werden:

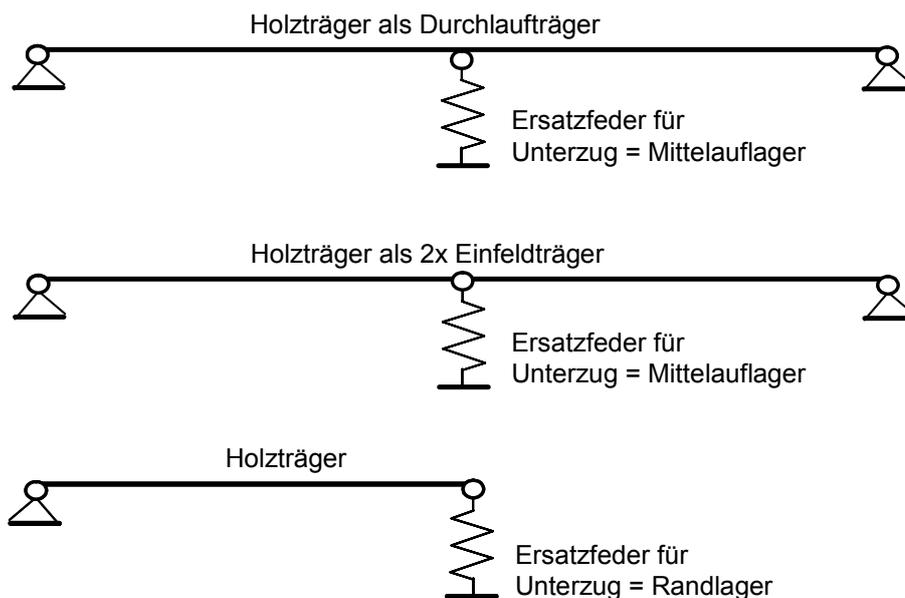


Abbildung 9-6  
Schematische Darstellung der Lagerung von Holzträgern auf Unterzügen

Die Lagerung auf dem Unterzug stellt eine nachgiebige Lagerung dar, wobei sich die Ersatzfedersteifigkeit entlang des Unterzugs ändert: In der Nähe des Auflagers des Unterzugs geht die Ersatzfedersteifigkeit nach Unendlich, in Feldmitte eines Einfeldträger-Unterzugs kann sie näherungsweise nach Gleichung 9-21 ermittelt werden:

$$\text{Ersatzfedersteifigkeit} \approx \frac{48 \cdot EI_{\text{Unterzug}}}{L_{\text{Unterzug}}^3} \quad \text{Gleichung 9-21}$$

Wird nur für die ungünstigste Stelle - die Feldmitte des Unterzugs - bemessen, wird das Ergebnis zu unwirtschaftlich; wird die Nachgiebigkeit des Lagers vernachlässigt, wird die Decke zu weich.

### 9.3.1.3 Mindeststeifigkeit

Die einfachste Regel für die Mindeststeifigkeit eines Unterzugs findet sich im Forschungsbericht [Kreuzinger / Mohr, 1999].

„Unterzüge als Zwischenaufleger sollten möglichst steif ausgeführt werden. Die Übertragung der Schwingungen zwischen zwei Einfeldträgern ist durch einen gemeinsamen „weichen“ Unterzug möglich. Der Unterzug sollte für erhöhte Anforderungen bemessen werden.

Für den Einfeldträger heißt das:

$$w_{\text{stat}} = \frac{1 \text{ kN} \cdot L_{\text{Unterzug}}^3}{48 \cdot EI_{\text{Unterzug}}} \leq 0,25 \text{ mm} \quad \text{Gleichung 9-22}$$

In [Hamm, 2006] wird diese Forderung wiederholt und ergänzt durch ein weiteres Kriterium, nämlich einer Mindestfrequenz des Unterzugs von 7,2 Hz unter ständiger und quasi- ständiger Einwirkung.

Umgerechnet auf die in diesem Vorhaben gefundenen Ergebnisse, nämlich dass die Verkehrslastanteile unberücksichtigt bleiben sollen, ergibt sich für den Einfeldträger-Unterzug:

$$f_e = \frac{\pi}{2 \cdot L_{\text{Unterzug}}^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_{\text{Unterzug}}}{m}} \geq 8 \text{ Hz} \quad \text{Gleichung 9-23}$$

$m$  sind die Massen der Einwirkungen auf den Unterzug aus Eigenlast unter Berücksichtigung der Lasteinzugsbreite der Decke (Umrechnung von Kraft [kN] auf Masse [kg] erforderlich).

In [Petersen, 2000] wird eine Näherungsformel zur Berechnung einer Gesamt- Eigenfrequenz aus zwei Teil-Eigenfrequenzen vorgestellt (Überlagerungsformel nach Dunkerley, Gleichung 9-24).

$$f_{e,ges} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{e,1}^2} + \frac{1}{f_{e,2}^2}}}$$

Gleichung 9-24

### 9.3.1.4 Anwendung der Überlagerungsformel nach Dunkerley

Gleichung 9-24 gilt nur für eindimensionale Systeme. Bei der Übertragung auf das zweidimensionale System Holzträger / Unterzug wird berücksichtigt, dass die maximalen Durchbiegungen der Holzträger und des Unterzugs an unterschiedlichen Stellen sind (Abbildung 9-7 links) und sich die Durchbiegung des Unterzugs über dessen Länge ändert (Abbildung 9-7 rechts).

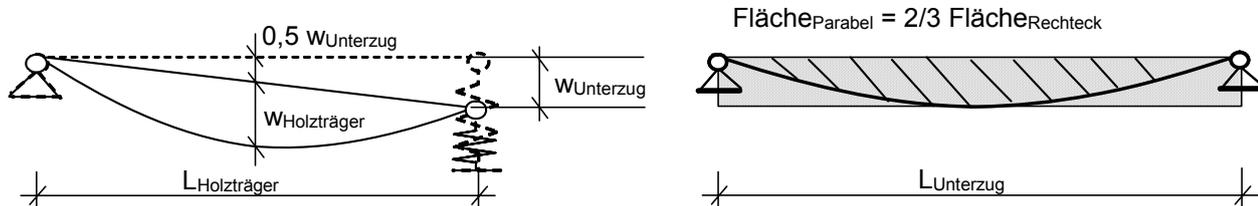


Abbildung 9-7

Überlegungen zur Anwendung der Überlagerungsformel nach Dunkerley

Gleichung 9-24 wird nun sinngemäß auf das System Holzträger / Unterzug angewendet. Die Bedingung für die Eigenfrequenz des Gesamtsystems nach [DIN 1052] soll eingehalten werden. Nach Umformen erhält man Gleichung 9-25:

$$f = \frac{5}{\sqrt{0,8 \cdot w_{ges}}} = \frac{5}{\sqrt{(0,8 \cdot w_{Holzträger} + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 2/3 \cdot w_{Unterzug})}} \geq 7,2 \text{ Hz}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{f^2} &= \frac{(0,8 \cdot w_{Holzträger} + 0,8 \cdot 0,5 \cdot 2/3 \cdot w_{Unterzug})}{25} = \frac{0,8 \cdot w_{Holzträger}}{25} + \frac{0,8 \cdot 0,5 \cdot 2/3 \cdot w_{Unterzug}}{25} = \\ &= \frac{1}{f_{Holzträger}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{Unterzug}^2} \leq \frac{1}{7,2^2} \end{aligned}$$

$$f_{e,ges} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{f_{e,Holzträger}^2} + \frac{1}{3 \cdot f_{e,Unterzug}^2}}} \geq f_{grenz}$$

Gleichung 9-25

Bei der Anwendung von Gleichung 9-25 werden der Unterzug und die Holzträger zunächst jeweils für sich betrachtet. Ihre Eigenfrequenzen werden mittels bzw. analog Gleichung 9-23 ermittelt. In Gleichung 9-25 eingesetzt, erhält man eine Abschätzung der Gesamt-Eigenfrequenz der Decke.

### 9.3.1.5 Holzträger als Durchlaufträger:

Gleichung 9-25 kann sinngemäß auch für Decken mit durchlaufenden Holzträgern auf Unterzügen (Mittelaufleger) angewendet werden. Zu beachten ist bei solchen Systemen, dass das Verhältnis der Steifigkeiten Holzträger zu Unterzug eine große Rolle spielt.

Holzträger, die als Durchlaufträger über ein Mittelaufleger geführt werden, werden je nach Verhältnis der Steifigkeiten überwiegend Schwingungen mit einem „großem“ Sinusbogen (Abbildung 9-8 oben) oder Schwingungen mit einer Doppelwelle (Abbildung 9-8 unten) ausführen. Zwischen den Eigenfrequenzen der beiden Extremfälle liegt Faktor 4.

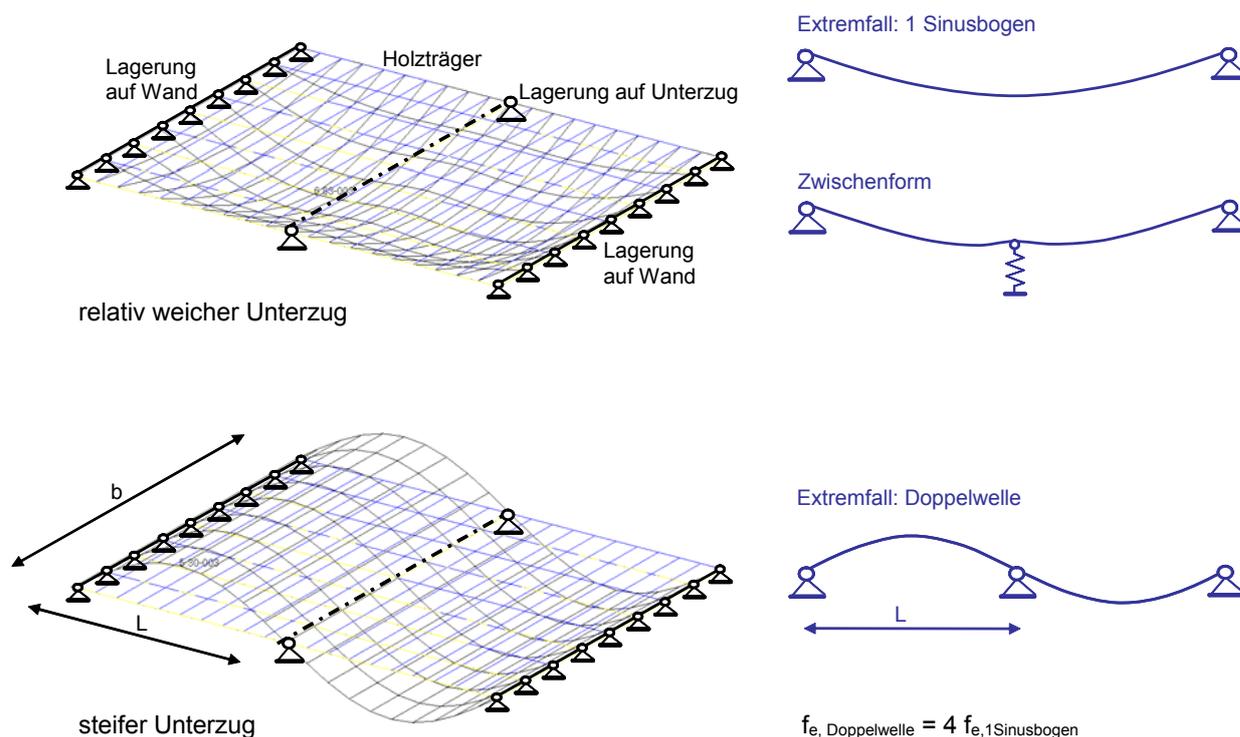


Abbildung 9-8

Erste Eigenform der Decke gesamt sowie eines einzelnen Holzträgers je nach Steifigkeit des Unterzugs

In [Kulcsár, 2006] wird eine Mindest- Biegesteifigkeit für Unterzüge angegeben, so dass die durchlaufenden (Holz-) Träger in der Doppelwelle schwingen:

$$EI_{\text{Unterzug}} \geq 0,667 \cdot EI_{\text{quer}} \cdot L \cdot \left( \frac{EI_{\text{längs}} \cdot b^4}{EI_{\text{quer}} \cdot L^4} - 1 \right) \quad \text{Gleichung 9-26}$$

Die Biegesteifigkeit in Deckenquerrichtung  $EI_{\text{quer}}$  resultiert z. B. aus dem Estrich und der Beplankung oder bei HBV- Decken aus der Betonschicht.

Anmerkung: Nach [Kreuzinger / Mohr, 1999] wird die Steifigkeit der Holzdecke in Querrichtung maßgeblich von der Steifigkeit des Estrichs bestimmt, weswegen bei der Berechnung der Steifigkeit in Querrichtung auch der Estrich angesetzt werden sollte.

Für den Grenzfall, dass keine Steifigkeit in Querrichtung vorhanden ist, kann Gleichung 9-26 wie folgt umgeformt werden:

$$EI_{\text{Unterzug}} \left( EI_{\text{quer}} = 0 \right) \geq 0,667 \cdot EI_{\text{längs}} \cdot b^4 / L^3 \quad \text{Gleichung 9-27}$$

### 9.3.1.6 Bemessungssituation im Stahlbau

Da die Unterzüge im Holzhausbau häufig in Stahl ausgeführt werden, werden die Systeme Holzträger / Unterzug meist getrennt betrachtet. Die Normen für den Stahlbau enthalten zu diesem Thema so gut wie keine brauchbaren Hinweise, wenn man berücksichtigt, dass 3 Hz als unterer Grenzwert für die Eigenfrequenz als zu wenig steif angesehen werden muss:

[DIN 18 800-1]:

Abs. (704) „Grenzzustände für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sind, soweit sie nicht in anderen Grundnormen oder Fachnormen geregelt sind, zu vereinbaren.“

[DIN V 18 800-5: 2004-11], nach [Schneider, 2006], S. 8.134 ff:

„Schlanke Verbunddecken und Verbundträger können infolge der jeweiligen Nutzung zu Schwingungen angeregt werden. Zur Wahrung der Gebrauchstauglichkeit und des Wohlbehagens der Nutzer sind die Schwingungen zu begrenzen.“

„Die Empfindlichkeit des Trägers gegenüber Schwingungen kann über die Eigenfrequenz abgeschätzt werden. ... In Abhängigkeit von der vorgesehenen Nutzung muss überprüft werden, ob die Anforderungen hinsichtlich der Schwingungsbegrenzung eingehalten werden.“

Bei Geschossdecken üblicher Nutzung sollte die kleinste Eigenfrequenz i.d.R. nicht unter 3 Hz liegen. Zusätzlich zur Eigenlast muss ggf. die ständig wirkende veränderliche Last (Ausbauast) mitberücksichtigt werden.“

[Eurocode 3-1-1 1992]:

Abs. 4.3 „Dynamische Auswirkungen“. 4.3.2 „Tragwerke für öffentliche Bauten“

Es gilt „die Schwingungen und Vibrationen von Tragwerken für öffentliche Bauten so zu begrenzen, dass ein spürbares Unbehagen der Nutzer ausgeschlossen wird.“

„Für Decken, die regelmäßig von Menschen begangen werden, wie z. B. Decken von Wohnungen, Büros und ähnlichem, darf die unterste Eigenfrequenz nicht kleiner als 3 Hz sein.“

[Eurocode 3-1-1 2005] neuere Fassung von 2005:

Abs. 7.2.3 „Dynamische Einflüsse“: Es sind „in der Regel die Vibrationen in Tragwerken mit öffentlicher Nutzung so zu begrenzen, dass eine starke Beeinträchtigung für den Benutzer vermieden wird. Die Grenzwerte sind in der Regel für jedes Projekt individuell festzulegen und mit dem Auftraggeber abzustimmen.“

#### 9.3.1.7 Grenzwerte

Die vorgestellten Anforderungen an die Steifigkeit und die Eigenfrequenz gelten für Einfeldträger und Durchlaufträger und - sinnvoll angewendet - d. h. mit Berücksichtigung der Unterzugverformungen, näherungsweise auch für umfangreichere Systeme. Das bedeutet, dass beim Nachweis des Stahlträgers schon auf die aufliegenden Holzträger geachtet werden sollte.

Bei vom Einfeldträger abweichenden Systemen kann das zweidimensionale System Holzträger / Unterzug am besten mit FEM abgebildet werden, wobei auf die Grenz- / bzw. Mindesteigenfrequenz geachtet werden sollte.

Für die eindimensionale Berechnung wurden Ersatzsysteme und mehrere Näherungsgleichungen vorgestellt. Bis genauere Ergebnisse zum Thema „Steifigkeit von Unterzügen“ vorliegen, wird empfohlen,

- den nach Gleichung 9-22 ( $w(1kN)$ ) ermittelten Wert für die Mindeststeifigkeit einzuhalten und  
entweder

- die gesamte Durchbiegung (Unterzug und Holzträger) auf einen Grenzwert von 5 mm (bei 8 Hz) oder 9 mm (bei 6 Hz) zu beschränken,
- oder
- die Gesamteigenfrequenz nach Gleichung 9-25 und Einzeleigenfrequenz des Unterzugs von  $f_{\text{grenz}}$  einzuhalten.

## 9.4 Zusammenfassung Bemessungsvorschlag (Kurzübersicht)

Eine Übersicht über den Bemessungsvorschlag wird auf den folgenden zwei Seiten gegeben.

Das Schwingungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens an der TU München untersucht. Im Folgenden sind die relevanten Formeln und Werte für den Schwingungsnachweis für Holzdecken zusammengefasst. Drei Kriterien werden untersucht: Die Eigenfrequenz der Decke, die Durchbiegung unter einer Einzellast und die Konstruktion inkl. Aufbau der Decke.

### 1. Eigenfrequenz

Die Eigenfrequenz der Decke soll größer sein als der Grenzwert  $f_{\text{grenz}}$  nach Tabelle 2. Die Eigenfrequenz kann durch Messung oder Berechnung ermittelt werden. Bei der Berechnung darf das tatsächliche statische System angesetzt werden, z. B. Durchlaufträgerwirkung. Die Biegesteifigkeit des Estrichs darf rechnerisch angesetzt werden. Für die Masse darf allein die Eigenmasse angesetzt werden, Verkehrslast und Trennwandzuschlag müssen nicht eingerechnet werden. Lagerungen auf nachgiebigen Unterzügen müssen berücksichtigt werden.

$$f_{e,\text{Einfeld-Balken}} = \frac{\pi}{2 \cdot \ell^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_\ell}{m}} \quad \text{Eigenfrequenz Einfeldträger mit } I = \frac{h^3 \cdot b_{\text{Balken}}}{12}$$

$$f_{e,\text{Zweifeld-Balken}} = k_f \cdot f_{e,\text{Einfeld-Balken}} \quad \text{Eigenfrequenz Zweifeldträger mit } k_f \text{ nach Tab. 1}$$

$$f_{e,\text{Platte}} = f_{e,\text{Balken}} \cdot \sqrt{1 + 1/\alpha^4} \quad \text{Eigenfrequenz Platte mit gelenkiger vierseitiger Lagerung}$$

$$\alpha = \frac{b}{\ell} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_\ell}{EI_b}} \quad \text{Beiwert zur Berechnung der zweiachsigen Tragwirkung}$$

$\ell$  Spannweite beim Einfeldträger.  
 Beim Mehrfeldträger: Spannweite des größten Feldes.  
 $\ell_1$  Beim Zweifeldträger: Spannweite des kleineren Feldes  
 $m$  Masse infolge Eigengewicht der Decke in [kg/m<sup>2</sup>]  
 ohne Verkehrslast und Trennwandzuschlag  
 $b$  Spannweite der Decke in Querrichtung oder Deckenfeldbreite  
 $EI_\ell$  effektive Biegesteifigkeit in Längsrichtung je Meter Breite:  
 Biegesteifigkeit der Decke + Biegesteifigkeit des Estrichs \*\*)  
 $EI_b$  effektive Biegesteifigkeit in Querrichtung mit  $(EI)_\ell > (EI)_b$ :  
 Biegesteifigkeit der Decke + Biegesteifigkeit des Estrichs \*\*)  
 $E_{\text{Estrich}}$  Zement-Estrich:  $E = 25\,000 \text{ N/mm}^2$ ;  
 Anhydrit-Estrich:  $E = 14\,000 \text{ N/mm}^2$ ;  
 Gussasphalt-Estrich:  $E = 10\,000 \text{ N/mm}^2$   
 $EI_{\text{quer BST}}$  Brettstapel, genagelt oder gedübelt:  $EI_{\text{quer}} = 0,0005 EI_{\text{längs}}$   
 Brettstapel geklebt:  $EI_{\text{quer}} = 0,03 EI_{\text{längs}}$

\*\*\*) Bei Installationsführungen oder Fugen im Estrich oder Ausführung als Fertigteil mit Fugen ist die Biegesteifigkeit des Estrichs entsprechend zu reduzieren. Nicht kraftschlüssig ausgeführte Stöße zwischen Elementen müssen bei der Ermittlung der Querbiegesteifigkeit berücksichtigt werden.

### 2. Durchbiegung unter Einzellast von 2 kN oder Steifigkeitskriterium

Die Durchbiegung unter einer Einzellast von 2 kN soll kleiner sein als der Grenzwert  $w_{\text{grenz}}$  nach Tabelle 2. Bei Durchlaufträgern darf die Durchlaufwirkung **nicht** berücksichtigt werden. Hier erfolgt der Nachweis am Ersatzsystem eines beidseitig gelenkig gelagerten Einfeldträgers mit der Spannweite des größten Feldes.

$$w(2\text{kN}) = \frac{2 \cdot \ell^3}{48 \cdot EI_\ell \cdot b_{w(2\text{kN})}} \quad \text{Durchbiegung unter einer Einzellast von 2 kN am Einfeldträger}$$

$$b_{w(2\text{kN})} = \min \left\{ \begin{array}{l} b_{\text{ef}} \\ \text{Raumbreite} \end{array} \right\} \quad \text{anzusetzende mittragende Breite mit } b_{\text{ef}} = \frac{\ell}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_b}{EI_\ell}} = \frac{b}{1,1 \cdot \alpha}$$

Liegt die Decke nachgiebig auf Unterzügen auf, so ist bei der Berechnung der Eigenfrequenz und der Durchbiegung unter der Einzellast  $w(2kN)$  die Nachgiebigkeit der Unterzüge zusätzlich zu berücksichtigen.

### 3. Konstruktive Anforderungen an den Aufbau der Decke

Entscheidend für das Schwingungsverhalten ist neben der Frequenz und der Steifigkeit auch der Aufbau der Decke. Eine schwimmende Lagerung des Estrichs ist in jedem Fall erforderlich. Eine (möglichst schwere) Schüttung verbessert das Schwingungsverhalten. Gleichzeitig bietet sie die Möglichkeit der Installationsführung. Je schwerer die Schüttung, desto größer die Verbesserung der subjektiven Bewertung. Als „schwere“ Schüttung werden Schüttungen mit einem Flächengewicht von mindestens  $60 \text{ kg/m}^2$  bezeichnet. Dies entspricht z.B. einer 4 cm dicken Kalksplittschicht. Ob und welche Art der Schüttung erforderlich ist, kann Tabelle 3 entnommen werden.

### 4. Tabellen

Tabelle 1: Faktor zur Umrechnung der Eigenfrequenz von Einfeldträger auf Zweifeldträger

$\ell_1 / \ell$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$k_f$	1,0	1,09	1,15	1,20	1,24	1,27	1,30	1,33	1,38	1,42	1,56

Tabelle 2: Grenzwerte der Eigenfrequenz und Durchbiegung je nach Einbaulage und Bewertung

Einbaulage bzw. Anforderung	Decke zwischen unterschiedlichen Nutzungseinheiten	Decke innerhalb einer Nutzungseinheit	Keine Anforderungen an das Schwingungsverhalten
Bewertung	1,0 bis 1,5	1,5 bis 2,5	2,5 bis 4,0
Im Rahmen des Vorhabens untersuchte Raumnutzung	z. B. Wohnungstrenndecken in Mehrfamilienhäusern, Decken in Büros mit PC-Nutzung oder Besprechungsräumen, auch: Flure mit kurzen Spannweiten	z.B. Decken in üblichen Einfamilienhäusern, Decken im Bestand, oder mit Zustimmung des Bauherren	z.B. Decken unter nicht genutzten Räumen oder nicht ausgebauten Dachräumen
Empfindungen des Schwingungsverhaltens	Schwingungen werden gar nicht oder nur gering spürbar, wenn man sich darauf konzentriert und nicht als störend empfunden.	Schwingungen werden als spürbar, jedoch nicht als störend empfunden.	Schwingungen werden als (deutlich) spürbar, unangenehm und auch teilweise störend empfunden.
$f_e \geq f_{\text{grenz}}$	$f_{\text{grenz}} = 8 \text{ Hz}$	$f_{\text{grenz}} = 6 \text{ Hz}$	-
$w(2kN) \leq w_{\text{grenz}}$	$w_{\text{grenz}} = 0,5 \text{ mm}$	$w_{\text{grenz}} = 1,0 \text{ mm}$	-

Tabelle 3: Konstruktive Anforderung je nach Art der Rohdecke, Einbaulage und Bewertung

Art der Rohdecke	Art des Estrichs	Anforderung an Aufbau bei Bewertung 1,0 bis 1,5	Anforderung an Aufbau bei Bewertung 1,5 bis 2,5
Flächige Massivholzdecken (Brettsperrholz-, Brettstapeldecken)	schwimmender Nassestrich	schwimmend auf schwerer oder leichter Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	schwimmend auf schwerer Schüttung *)	schwimmend auf schwerer Schüttung *)
Holzbalkendecken oder Trägerroste	schwimmender Nassestrich	schwimmend auf schwerer Schüttung	schwimmend (auch ohne Schüttung)
	schwimmender Trockenestrich	nicht möglich	schwimmend auf schwerer Schüttung

# 10 Bemessungsbeispiele

## 10.1 Decke aus BSP

### 10.1.1 Statisches System

Decke eines Einfamilienhauses als Brettsper Holzdecke:

Statisches System: Dreifeldträger mit 4,60m/3,45m/4,50m

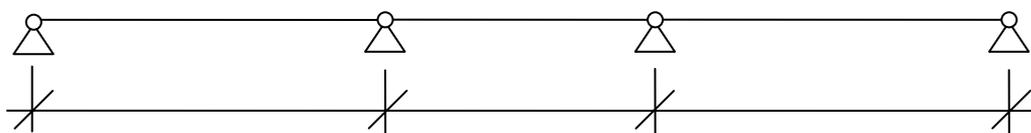


Abbildung 10-1

Skizze des Erdgeschosses und der Decke über EG der BSP- Decke

#### Ständige Einwirkung und Aufbau:

22 mm Holzboden (Parkett)	0,10 kN/m <sup>2</sup>
60 mm Zementestrich	1,32 kN/m <sup>2</sup>
PE Foliendämmung	0,01 kN/m <sup>2</sup>
30 mm EPS-Perlite-Schüttung	0,10 kN/m <sup>2</sup>
146 mm Brettsper Holzplatte	0,67 kN/m <sup>2</sup>
Summe:	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">2,20 kN/m<sup>2</sup></span>

#### Geometrie

$$\ell = 4,60 \text{ m}; \quad \ell_1 = 3,45 \text{ m}$$

$$b = 3,50 \text{ m}$$

$$m_{\text{ständig}} = 220 \text{ kg/m}^2$$

#### Steifigkeiten

$$EI_{\ell} = 2,588 \text{ MNm}^2/\text{m}; \quad EI_b = 0,421 \text{ MNm}^2/\text{m} \quad (\text{ohne Estrich})$$

$$EI_{\ell, \text{Estrich}} = 2,588 + 25000 \cdot \frac{0,06^3 \cdot 1,0}{12} = 2,588 + 0,45 = 3,038 \text{ MNm}^2/\text{m}$$

$$EI_{b, \text{Estrich}} = 0,421 + 0,45 = 0,871 \text{ MNm}^2/\text{m}$$

### 10.1.2 Eigenfrequenz

- **Einachsig, nur Steifigkeit der Platte und nur ständiger Lastanteil:**

Mit Hilfe eines FE- Programms wurde die Eigenfrequenz wie folgt ermittelt:

→ **9,4 Hz > fgrenz = 8,0 Hz** für Bewertung 1,0 bis 1,5

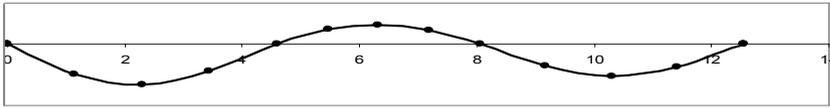


Abbildung 10-2  
Eigenform der Schwingungen mit der 1. Eigenfrequenz berechnet mit FE- Programm

Berechnung mit Hilfe der Näherungsformel nach Gleichung 9-3:

$$f_{e,\text{Einfeld-Balken}} = \frac{\pi}{2 \cdot \ell^2} \cdot \sqrt{EI_\ell} = \frac{\pi}{2 \cdot 4,60^2} \cdot \sqrt{\frac{2,588 \cdot 10^6}{220}} = 8,04 \text{ Hz}$$

Näherungsweise Dreifeldträger mit Formel für Zweifeldträger berechnet:

$$f_{e,\text{Zweifeld-Balken}} = k_f \cdot f_{e,\text{Einfeld-Balken}}$$

$$k_f \left( \frac{\ell_1}{\ell} = \frac{3,45}{4,60} = 0,75 \right) = 1,175 \rightarrow f_{e,\text{Dreifeld-Balken}} = 1,175 \cdot 8,04 = 9,45 \text{ Hz}$$

→ **9,45 Hz > fgrenz = 8,0 Hz**

- **Zweiachsig, nur Steifigkeit der Platte und nur ständiger Lastanteil:**

$$f_{\text{Platte}} = f_{\text{Balken}} \cdot \sqrt{1+1/\alpha^4} = 9,4 \cdot \sqrt{1+1/1,20^4} = 9,4 \cdot 1,20 = 11,4 \text{ Hz}$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{b}{\ell} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_\ell}{EI_b}} = \frac{3,5}{4,6} \cdot \sqrt[4]{\frac{2,588}{0,421}} = 1,20$$

→ **11,4 Hz > fgrenz = 8,0 Hz**

- **Zweiachsig, Steifigkeit der Platte + Estrich, nur ständiger Lastanteil:**

$$f_{\text{Balken+Estrich}} = 9,4 \cdot \sqrt{3,038/2,588} = 10,2 \text{ Hz und}$$

$$\alpha_{\text{Estrich}} = \frac{b}{\ell} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_{\ell, \text{Estrich}}}{EI_{b, \text{Estrich}}}} = \frac{3,5}{4,6} \cdot \sqrt[4]{\frac{3,038}{0,871}} = 1,03$$

$$f_{\text{Platte+Estrich}} = f_{\text{Balken+Estrich}} \cdot \sqrt{1 + 1/\alpha^4} = 10,2 \cdot \sqrt{1 + 1/1,03^4} = 10,2 \cdot 1,37 = 14,0 \text{ Hz}$$

→ **14,0 Hz > fgrenz = 8,0 Hz**

▪ **Vergleich mit Messwert**

Eine Schwingungsmessung am Gebäude ergab eine 1. Eigenfrequenz von 16 Hz.

→ **16,0 Hz > fgrenz = 8,0 Hz**

### 10.1.3 Durchbiegung unter Einzellast von 2 kN oder Steifigkeitskriterium

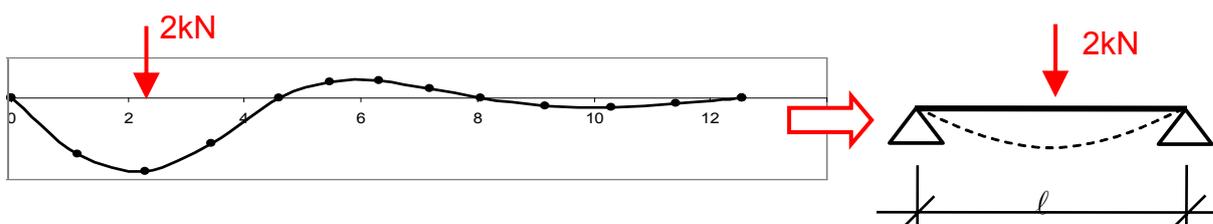


Abbildung 10-3

Berechnung der Durchbiegung unter Einzellast am Ersatzsystems des Einfeldträgers

▪ **Nur Steifigkeit der Platte:**

$$w(2\text{kN}) = \frac{2 \cdot \ell^3}{48 \cdot EI_{\ell} \cdot b_{\text{ef}}} = \frac{2 \cdot 4,60^3}{48 \cdot 2,588 \cdot 2,65} = 0,59 \text{ mm}$$

$$\text{mit } b_{\text{ef}} = \frac{\ell}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_b}{EI_{\ell}}} = \frac{b}{1,1 \cdot \alpha} = \frac{3,50}{1,1 \cdot 1,2} = 2,65 \text{ m}$$

→ **0,59 mm < wgrenz = 1,0 mm für Bewertung 1,5 bis 2,5**

▪ **Mit Steifigkeit der Platte + Estrich:**

$$w(2kN) = \frac{2 \cdot \ell^3}{48 \cdot EI_{\ell, \text{Estrich}} \cdot b_{ef, \text{Estrich}}} = \frac{2 \cdot 4,60^3}{48 \cdot 3,038 \cdot 3,05} = 0,44 \text{ mm}$$

$$\text{mit } b_{ef, \text{Estrich}} = \frac{\ell}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{EI_{b, \text{Estrich}}}{EI_{\ell, \text{Estrich}}}} = \frac{b}{1,1 \cdot \alpha_{\text{Estrich}}} = \frac{3,50}{1,1 \cdot 1,03} = 3,05 \text{ m}$$

→ **0,44 mm < w<sub>grenz</sub> = 0,5 mm für Bewertung 1,0 bis 1,5**

### 10.1.4 Konstruktive Anforderungen an den Aufbau der Decke

Nach Tabelle 9-2 ist für die Rohdeckenart „Flächige Massivholzdecke, Brettsper Holzdecke“ eine „schwimmende Lagerung auf schwerer oder leichter Schüttung“ für die **Bewertung 1,0 bis 1,5** bzw. eine „schwimmende Lagerung (auch ohne Schüttung)“ für die **Bewertung 1,5 bis 2,5** erforderlich.

Tatsächlich ist der Zementestrich auf einer leichten Perlite Schüttung gelagert. Die Konstruktion erfüllt in allen drei Kriterien die Anforderungen an die Bewertung 1,0 bis 1,5.

### 10.1.5 Subjektive Einschätzung der Decke

Die Schwingungen sind nur gering spürbar und nur dann, wenn man sich darauf konzentriert. Sie werden nicht als störend empfunden.

Hinweis: In einem üblichen Einfamilienhaus würde auch das Einhalten der Grenzwerte für die Bewertung 1,5 bis 2,5 genügen.

# 11 Zusammenfassung

Ziel der hier vorgestellten **Konstruktions- und Bemessungsregeln** ist die Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Sie sollen es Tragwerksplanern und ausführenden Firmen ermöglichen, den Nachweis des Schwingungsverhaltens von Holzdecken zu führen.

In Abhängigkeit von der Nutzung oder den angestrebten Anforderungen an das Schwingungsverhalten wurden die erforderlichen Nachweise, Begrenzungen und Bewertungen für die Konstruktion in Tabelle 9-1 und Tabelle 9-2 zusammengestellt.

Zur Nachweisführung ist das **Frequenzkriterium** nach Gleichung 3-4 entweder nach Gleichung 9-2 oder Gleichung 9-3 einzuhalten. Dabei darf nach Meinung der Autorinnen die Biegesteifigkeit des Estrichs (ohne Verbundwirkung) sowie bei zweiachsig gespannten Deckenplatten zusätzlich die Drillsteifigkeit bei der Berechnung der Eigenfrequenz berücksichtigt werden. Für die Masse  $m$  werden nur die ständigen Einwirkungen angesetzt. Im Gegensatz zum vereinfachten Nachweis nach [DIN 1052] („ $w_{quasi-ständig} \leq 6mm$ “) wird eine Ermittlung der Eigenfrequenz nur unter ständigen Einwirkungen ohne quasi-ständige Verkehrslastanteile vorgeschlagen. Alternativ zur Berechnung können auch Messergebnisse für den Nachweis herangezogen werden. Bei kleineren Frequenzen kann eine genauere Untersuchung durchgeführt werden. Hierbei muss eine Mindestfrequenz nach Gleichung 9-7 eingehalten und die Schwingbeschleunigung entsprechend Gleichung 9-8 ff begrenzt werden.

Zusätzlich empfehlen die Autorinnen, das **Steifigkeitskriterium** nach Gleichung 9-14 mit einem Grenzwert je nach Anforderung nach Gleichung 9-15 oder Gleichung 9-16 zwischen 0,5 mm und 1 mm. Die Durchbiegung  $w(2kN)$  infolge der Kraft  $F_k = 2kN$  wird für einachsig gespannte Platten bezogen auf einen Deckenstreifen mit der Breite  $b_{w(2kN)}$  nach Gleichung 9-17 am Einfeldträger ermittelt. Bei Durchlaufträgern darf die Durchlaufwirkung **nicht** berücksichtigt werden. Hier erfolgt der Nachweis am Ersatzsystem des gelenkig gelagerten Einfeldträgers mit der Spannweite des größten Feldes. Die Biegesteifigkeit des Estrichs darf ebenfalls berücksichtigt werden.

Der dritte nach [Eurocode 5] empfohlene Nachweis untersucht die **Einheitsimpuls-geschwindigkeitsreaktion**. Bei allen 130, im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Decken war der Nachweis der Schwinggeschwindigkeit nach dem Einheitsimpuls

eingehalten, sogar bei Rohkonstruktionen und anderen als unangenehm eingestuft Decken. Der in [Kreuzinger / Mohr, 1999] vorgeschlagene 1/3-Grenzwert wurde nur bei manchen Rohkonstruktionen überschritten, bei Decken mit üblichen Aufbauten nicht. Aufgrund dieser Erfahrung kann gesagt werden, dass der Nachweis der Einheitsimpulsgeschwindigkeitsreaktion bei Decken mit „üblichem“ Schallschutzaufbau nicht maßgebend wird. Vereinfachend kann man sich deshalb auf die Nachweise Eigenfrequenz und Steifigkeit beschränken.

Das Schwingungsverhalten von Decken wird neben den oben aufgeführten Systemgrößen wesentlich von der Art der **Konstruktion** und dem **Ausbau** beeinflusst.

Die untersuchten **Holz-Beton-Verbunddecken** wiesen größtenteils bereits als Rohdecken ein angenehmes Schwingungsverhalten auf.

**Flächige Massivholzdecken** (z.B. aus Brettstapel- oder Brettsperrholzplatten) haben bei Einhaltung der Anforderungen nach Tabelle 9-1 und Tabelle 9-2 das Schwingungsverhalten betreffend ebenfalls einige Vorteile: Sie besitzen durch die massive Bauweise eine relativ hohe Eigenmasse und Querbiegesteifigkeit (im Vergleich z. B. zu einer Holzbalkendecke). Bei zweiachsig gespannten Deckenfeldern führt die Drillsteifigkeit der massiven Platten zu höheren Eigenfrequenzen. Messungen an Decken ohne Aufbauten, d.h. noch während des Rohbauzustandes, zeigten, dass die Anordnung einer schwimmenden Estrichschicht (Trocken- oder Nassestrich, ggf. auf Schüttung) jedoch sehr wichtig ist – nicht nur für den Schallschutz sondern auch für das Schwingungsverhalten. Ein solcher (Tritt-) Schallschutz-Aufbau sollte gegeben sein.

**Holzbalkendecken** (oder Trägerroste) sollten immer mit einem schwimmenden Nassestrich, möglichst in Kombination mit einer Schüttung ausgeführt werden.

## 12 Ausblick und Abgrenzung

Mit den vorliegenden Konstruktions- und Bemessungsregeln werden die bekannten Regeln erweitert bzw. unterlegt. Dabei sind die folgenden Fragestellungen aufgetreten, denen nicht im Rahmen des Forschungsvorhabens nachgegangen werden konnte:

- Leichte Trennwände  
Einfluss wurde festgestellt, aber nicht weiter quantifiziert bei in-situ-Messungen  
Wesentlicher Einfluss auf das Schwingungsverhalten vorhanden, deshalb sollte der Einfluss quantifizierbar werden, am besten durch Labormessungen
  
- Durchlaufträger:  
Auf Hinwirken des projektbegleitenden Ausschusses hin wurde im Versuchsstand an der MFPA in Leipzig zusätzlich ein Durchlaufträgersystem untersucht. Dennoch scheint hier weiterer Untersuchungsbedarf gegeben.
  
- Decken mit Frequenzen kleiner 4,5 Hz:  
Trotz intensiver Recherche wurden keine solchen Decken gefunden, so dass mangels geeigneter Messobjekte keine Aussagen zu solchen Decken getroffen werden können.
  
- Elementstoß Art und Wirksamkeit:  
(Beispiele für Ausführung siehe: in-situ-Messung B-02-NE-sch)  
Wie wird die effektive /mitwirkende Breite beeinflusst durch Elementbreite und Verbindung zwischen den Elementen? Im projektbegleitenden Ausschuss wurde die Meinung vertreten, dass 1,5 bis 2 Elemente mittragen. Hier ist noch Forschung sinnvoll zu wirksamer Querbiegesteifigkeit bzw. Querkraftsteifigkeit
  
- Werden Decken nachgiebig auf Unterzügen gelagert, ist dies bei der Nachweisführung zu berücksichtigen, indem die Eigenfrequenz und die Durchbiegung für das Gesamtsystem berechnet werden. Eine Möglichkeit zur Berechnung wurde hier angeführt. Sie sollte auf größerer Datenbasis verifiziert werden.

- Für Decken unter Räumen, die für rhythmische Bewegungen genutzt werden, wie z. B. Tanz- oder Gymnastikräume oder Turnhallen, sollten genauere Untersuchungen durchgeführt werden, die nicht Gegenstand dieses Berichts sind.
  
- Leichte Decken mit schwimmend gelagertem Trockenestrich sollten weiter untersucht werden; sinnvoll sind hier Untersuchungen zum Schwingungsverhalten in Kombination mit dem Schallschutz
  
- Flure: Ein besonderes Augenmerk ist auf (schmale) Flure zu legen. Die Decken in diesen Bereichen wurden häufig als unangenehm empfunden.
  
- Aktuell findet auf Grund der Forschungsergebnisse in der Fachwelt eine Meinungsbildung über die Definition von Decken-Schwingverhaltensklassen statt, die klare, einfache Bauvertragsregelungen ermöglichen wollen bzw. sollen und damit eine Übersetzung der technischen Sachverhalte in eine Beschreibung für Bauherren.

## 13 Literaturverzeichnis

### 13.1 Literatur

- Bachmann, 1987      Bachmann, Hugo; Ammann, Walter: Schwingungsprobleme bei Bauwerken, Durch Menschen induzierte Schwingungen; IABSE - AIPC – IVBH, London, 1987.
- Baumann, 1988      Baumann, Karl; Bachmann, Hugo: Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke. Versuchsbericht. Institut für Baustatik und Konstruktion. ETH Zürich. Mai 1988.
- Eibl, 1997            Eibl, J.; Häussler-Combe, U.: Baudynamik; In: Beton-Kalender 1997, Teil II; Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1997; S. 755-861.
- Feldmann, 2007      Feldmann, M., Heinemeyer, Ch., Völling, B.: "Design guide for floor vibrations", ARCELOR Commercial Sections, 2007.  
Download: <http://www.arcelor.com/sections/en/literature/default.html>
- Fitz, 2008            Fitz, Mario: Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Deckensystemen aus Brettsperrholz (BSP). Diplomarbeit an der TU Graz. 2008.
- Frasold et al         Frasold, W.; Veres, E: Schallschutz + Raumakustik in der Praxis; Huss-Medien GmbH, Berlin, 2. Auflage
- Hamm, 2005          Hamm, Patricia: Schwingungen bei Decken und Brücken – Theoretische Prognose und praktische Analyse. In: Ingenieurholzbau – Karlsruher Tage. Hrsg.: Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen und Bruderverlag, Karlsruhe. 2005. S. 27-36.
- Hamm, 2006          Hamm, Patricia: Warum Decken zu schwingen beginnen. In: bauen mit holz 3/2006. S. 24-29.
- Hamm / Richter -     Hamm, Patricia, Richter, Antje: Schwingung von Brettsperrholzplatten. BSP 2009            In: BSPHandbuch – Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz. Hrsg.: G. Schickhofer, T. Bogensperger, T. Moosbrugger, TU Graz. 2009. S. D-57 – D-112.
- Hechler, 2007:      Hechler, Oliver; Demarco, Toni; Feldmann, Markus; Heinemeyer, Christoph; Völling, Boris: „Einfaches Bemessungsverfahren für fußgängerinduzierte Deckenschwingungen“ In: D-A-CH Tagung 2007. 27. bis 28. September 2007, Wien.
- Hoheisel, 2009      Hoheisel, Meike: FE – Modellierung eines Versuchsstandes zum Schwingungsverhalten einer Holzbalkendecke. Studienarbeit an der TU München. 2009.

- Hu, 1998                    Hu Lin J. Effects of solutions for sound isolation and fire resistance on serviceability performance of engineered wood floors Proceedings of the World Conference on timber Engineering; 17.-20. August 1998.
- Hu et al., 2001            Hu, L. J.; Chui, Y. H.; Onysko, D. M.: Vibration serviceability of timber floors in residential construction. In: Prog. Struct. Engng Mater, 3:228-237. 2001.
- Hu, 2004                    Hu, Lin: A new design method to control vibrations induced by foot steps in timber floors. In: International council for research and innovation, Working Commission W18. Timber structures, Meeting 37, Edinburgh, UK.
- Kreuzinger, 2003        Kreuzinger, Heinrich: Schwingungsanalyse, Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. – In: Fachtagung Holz-Beton-Verbundbau. Stuttgart, 13. Oktober 2003.
- Kreuzinger/Mohr, 1999    Kreuzinger, Heinrich; Mohr, Bernhard: Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz; Abschlussbericht Januar 1999. TU München, Fachgebiet Holzbau. IRB-Verlag. T2857. Stuttgart 1999.
- Kulcsár, 2006            Kulcsár, Béla: Zu Schwingungen von Holz-Beton-Verbunddecken mit skelettartiger Auflagerung. In: „Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift“. 151. Jg., Heft 4-6/2006. S. 82-87.
- Maier, 2006                Maier, Claus: Ein Beitrag zur Modellierung des Schwingungsverhaltens schlanker Deckentragwerke unter fußgängerinduzierter Anregung. Dissertation. Bericht Nr. 34. Technische Universität Darmstadt. Statik und Dynamik. 2006.
- Mohr, 2001                Mohr, Bernhard: Schwingungen von Wohnungsdecken aus Holz, Stahl und Beton. Vorschläge für eine zutreffende Bewertung. – In: Ingenieurholzbau; Karlsruher Tage. Forschung für die Praxis. Karlsruhe, 2001. Hrsg.: Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe (TH). S. 81 – 98. Bruderverlag. 2001.
- Murray, 2003             Murray, Thomas M.; Allen, David E.; Ungar, Eric E. (2003): Floor vibrations due to human activity; Steel design guide series 11. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois. Oct. 2003.
- Ohlsson, 1982            Ohlsson, Sven: Floor vibrations and human discomfort. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden. 1982.
- Petersen, 2000            Petersen, Christian: Dynamik der Baukonstruktionen. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig / Wiesbaden, 2000.
- Richter, 2008             Richter, Antje: Untersuchungen des Schwingungsverhaltens von Brettsperrholz, Untersuchungsbericht F 2.2/08-139, MFPA Leipzig GmbH vom 01.07.2008.

- Schneider, 2006 Schneider, K.-J.: Schneider Bautabellen. 17. Auflage. Werner Verlag. 2006.
- Schickhofer et al, 2009 BSPHandbuch – Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz. Hrsg.: G. Schickhofer, G., Bogensperger, T., Moosbrugger, T.: TU Graz. 2009.
- SCI, 2007 SCI Publication P354: Smith, A. L.; Hicks, S.J.; Devine, P.J.: “Design of Floors for Vibration: A new Approach” SCI Publication 354. The Steel Construction Insitute. 2007.
- Tredgold, 1828 Tredgold, T. (1828): Elementary Principles of Carpentry. 2nd Edition. Verlag unbekannt.
- VoF, 2006 European Commission, 2006. Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls – Vibration of floor (VoF). Report EUR 21972 EN. ISBN 92-76-01705-05.
- Weckendorf, 2006 Weckendorf, Jan; Zhang, Binsheng; Kermani, Abdy; Reid, David: “Assessment of Vibrational Performance of Timber Floors” In: WCTE 2006 - 9th World Conference on Timber Engineering - Portland, OR; August 06-10, 2006.
- Weckendorf, 2008 Weckendorf, Jan; Zhang, Binsheng; Kermani, Abdy; Reid, David; Andersen, Palle: “Damping Characteristics of Timber Flooring Systems with Respect to Low-Frequency Vibration Modes” In: WCTE 2008 Conference Proceedings; Miyazaki; Japan; 2008.
- Winter/Kreuzinger/  
Mestek, 2008 Winter, Stefan; Kreuzinger, Heinrich; Mestek, Peter: Flächen aus Brettstapeln, Brettsperrholz und Verbundkonstruktionen. Forschungsbericht im Rahmen von „Holzbau der Zukunft in der High-Tech-Offensive Zukunft Bayern“. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München. 2008.

## 13.2 Regelwerke

DIN 1048-5	DIN 1048-5 „Druckfestigkeit von Probekörpern“
DIN 1052	DIN 1052:2008-12. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken: Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
DIN 1055-100	DIN 1055:2001-03. Einwirkungen auf Tragwerke; Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln
DIN 4074-1	DIN 4074:2003-06. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit; Teil 1: Nadelschnittholz
DIN 4109	DIN 4109:1989-11. Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise
DIN 18800-1	DIN 18800: Stahlbauten. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. 11/1990.
DIN 18800-5	DIN 18800: Stahlbauten. Teil 5: Verbundtragwerke aus Stahl und Beton. Bemessung und Konstruktion. Entwurf von 1/1999
DIN V 18 800-5:	DIN 18800: Stahlbauten. Teil 5: Verbundtragwerke aus Stahl und Beton. Bemessung und Konstruktion. 11/2004
DIN 52 182	DIN 52 182:1976-09. Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte
DIN EN 408	DIN EN 408:2004-08 Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Deutsche Fassung EN 408:2003
DIN EN 789	DIN EN 789: 2005-01. Holzbauwerke - Prüfverfahren - Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen. Deutsche Fassung EN 789:2004
DIN EN 338	DIN EN 338:2003-09. Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen. Deutsche Fassung EN 338:2003
DIN EN 384	DIN EN 384:2004-05. Bauholz für tragende Zwecke - Bestimmung charakteristischer Werte für mechanische Eigenschaften und Rohdichte. Deutsche Fassung EN 384:2004
DIN EN 13 183-2	DIN EN 13183-2:2002-07 Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren. Deutsche Fassung EN 13183-2:200
DIN EN 13 986	DIN EN 13 986:2005-03. Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen - Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung. Deutsche Fassung EN 13986:2004

DIN EN 29 052-1	DIN EN 29 052-1:1992-08. Akustik; Bestimmung der dynamischen Steifigkeit; Teil 1: Materialien, die unter schwimmenden Estrichen in Wohngebäuden verwendet werden. Deutsche Fassung EN 29052-1:1991
DIN EN 52 182	DIN EN 52 182:1976-09. Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte
DIN EN ISO 6721-1	DIN EN ISO 6721-1:1996/12. Kunststoffe, Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften, Teil1: Allgemeine Grundlagen
Eurocode 3-1-1 1992	ENV 1993-1-1: 1992: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau. 1992
Eurocode 3-1-1 2005	EN 1993-1-1: 2005: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau. 2005
Eurocode 5	DIN EN 1995-1-2:2006-10. [Eurocode 5]: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung . Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2006
Erläuterungen,	Blaß, H. J.; Ehlbeck, J.; Kreuzinger, H.; Steck, G.: Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08; Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. 1. Auflage; Hrsg.: DGfH Innovations- und Service GmbH, München, 2004.

### 13.3 Software

ANSYS	Software für Finite-Elemente-Berechnungen
DIAdem	Software für Mehrkanal-Messgeräte der Firma International Instruments
Excel	Software für Tabellenkalkulation der Firma Microsoft
VIEW	Software für Auswertung der Messergebnisse von Schwingungsuntersuchungen



## 14 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1	Arbeitsschritte und deren Zusammenhänge .....	1-2
Abbildung 1-2	Großer Deckenversuchsstand in der großen Versuchshalle der MFPA Leipzig .	1-7
Abbildung 1-3	E-Modulbestimmung für Estrich, MFPA Leipzig.....	1-7
Abbildung 2-1	Einmassenschwinger .....	2-1
Abbildung 2-2	Statische Auslenkung beim Einmassenschwinger.....	2-3
Abbildung 2-3	Freie, gedämpfte Schwingung mit unterkritischer Dämpfung .....	2-6
Abbildung 2-4	Vergrößerungsfunktion für unterschiedliche Dämpfungswerte .....	2-8
Abbildung 2-5	Einfeldträger: Schwingungen in der ersten Eigenfrequenz und Querschnitt .....	2-10
Abbildung 2-6	Vergleich statische und dynamische Last.....	2-10
Abbildung 2-7	„Basiskurve“ aus [ISO 2631-2] .....	2-12
Abbildung 2-8	Verdeutlichung der mitschwingenden (=generalisierten) Masse nach einem Impuls .....	2-13
Abbildung 2-9	Kraft-Zeit-Verlauf beim Heeldrop.....	2-13
Abbildung 2-10	Kraft- Zeit- Verlauf beim Gehen mit Schrittfrequenz $f_s = 2$ Hz .....	2-15
Abbildung 2-11	Zusammenhang zwischen der Frequenz und der abgegebenen Kraft beim Gehen .....	2-16
Abbildung 2-12	Verdeutlichung der Zeit- und Ortsabhängigkeit der Kraft auf den Untergrund beim Gehen, aus [Kreuzinger, 1995] .....	2-17
Abbildung 3-1	Zusammenhang zwischen Spannweite, Durchbiegung und Eigenfrequenz beim Einfeldträger und Konsequenzen für den Nachweis nach [DIN 1052] (schwarz) und [Eurocode 5] (rot).....	3-3
Abbildung 3-2	Bemessungsdiagramm und Komfortklassen aus [Hechler 2007] .....	3-6
Abbildung 3-3	Ablauf des Schwingungsnachweises im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach [Eurocode 5] .....	3-8
Abbildung 3-4	Ablauf des Schwingungsnachweises im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach [DIN 1052] und [Erläuterungen].....	3-9
Abbildung 3-5	Empfohlene Bereiche für die Grenzwerte nach [Eurocode 5].....	3-16
Abbildung 4-1	Schematische Darstellung der mitschwingenden Masse einer Decke – angewandt beim Schwingungssteg .....	4-5
Abbildung 4-2	Stirnseite der Tragbalken des Schwingungsstegs und Einbringen der Schüttung	4-6
Abbildung 5-1	Die verwendete Messausrüstung: Beschleunigungsaufnehmer, Recorder und Laptop.....	5-1
Abbildung 5-2	Überblick über die ausgewerteten Messungen (aus eigenen Labor- und in-situ-Messungen sowie aus [Kreuzinger/Mohr, 1999] übernommenen Daten).....	5-3
Abbildung 5-3	Bezeichnungssystematik für in-situ-Messungen .....	5-4
Abbildung 5-4	Messung BSP-03/1-TE: Aufnehmer z unten angehängt, Aufnehmer y auf Doppelboden (oben), Aufnehmer x auf Betonplatten (unten) .....	5-5
Abbildung 5-5	Messung BSP-03/1-TE: Zeitschrieb Beschleunigung nach Heeldrop und Frequenzspektrum für die Kanäle x, y, z.....	5-6
Abbildung 5-6	Messung BSP-03/1-TE: Zeitschrieb Beschleunigung nach Heeldrop und Frequenzspektrum für die Kanäle x, y, z.....	5-6

Abbildung 5-7	Messung L-20/1-TE-sch: Zeitschrieb Beschleunigung nach Heeldrop und Frequenzspektrum für die Kanäle x, y, z .....	5-7
Abbildung 5-8	Messung L-20/1-TE-sch: Zeitschrieb Beschleunigung nach Sprung und Frequenzspektrum für die Kanäle x, y, z .....	5-8
Abbildung 5-9	Messung L-20/1-TE-sch: Zeitschrieb Beschleunigung (1Sek.) und Frequenzspektrum für den Kanal x, Anregung Laufen mit 2,5 Hz ( $=f_e/3$ ).....	5-8
Abbildung 5-10	Messung BSP-04/1-roh: Zeitschrieb Beschleunigung Anregung „regelloses Gehen“ und Frequenzspektrum für den Kanal x .....	5-9
Abbildung 5-11	Messung BSP-01/1-NE-sch: Zeitschrieb Beschleunigung Anregung „regelloses Gehen“ und Frequenzspektrum für den Kanal x .....	5-9
Abbildung 6-1	Großer Deckenversuchsstand für einachsig gespannte Deckenfelder .....	6-3
Abbildung 6-2	Beschleunigungsaufnehmer auf Holz befestigt in Aussparung von Unterhangdecke.....	6-4
Abbildung 6-3	Beschleunigungsaufnehmer auf Nassestrich .....	6-4
Abbildung 6-4	Anregung durch Ball .....	6-5
Abbildung 6-5	Anregung durch Shaker.....	6-5
Abbildung 6-6	Anregung durch Auslenkung mit Masse .....	6-5
Abbildung 6-7	Anregung durch Auslenkung mit ausgeklinkter Masse.....	6-5
Abbildung 6-8	Bezeichnungssystematik für Labor-Messungen.....	6-6
Abbildung 6-9	Holzbalkendecke im Großen Deckenversuchsstand, Zeichnung.....	6-7
Abbildung 6-10	Brettstapelelement mit stumpfen Stößen der Lamellen, BS-D im Versuchsstand.....	6-8
Abbildung 6-11	Stoßausbildung zwischen den beiden Deckenelementen der Brettstapeldecke..	6-8
Abbildung 6-12	Querschnitt Brettsperrholzplatte .....	6-9
Abbildung 6-13	Brettsperrholzelement mit Querkraft-Stoß .....	6-9
Abbildung 6-14	Brettsperrholzelement mit Momenten-Stoß.....	6-9
Abbildung 6-15	Großer Deckenversuchsstand - Auflagerdetail lose Rolle.....	6-11
Abbildung 6-16	Großer Deckenversuchsstand, Auflagerdetail feste Rolle.....	6-11
Abbildung 6-17	Großer Deckenversuchsstand, vierseitige Lagerung .....	6-12
Abbildung 6-18	Großer Deckenversuchsstand, vierseitige Lagerung, Isometrie .....	6-12
Abbildung 6-19	BSP-0 Durchlaufplatte .....	6-13
Abbildung 6-20	Großer Deckenversuchsstand, Randeinspannung.....	6-13
Abbildung 6-21	Großer Deckenversuchsstand, Randeinspannung von oben.....	6-13
Abbildung 6-22	Großer Deckenversuchsstand, Zeichnung Randeinspannung.....	6-14
Abbildung 6-23	Großer Deckenversuchsstand, Zeichnung Detail Randeinspannung .....	6-14
Abbildung 6-24	Großer Deckenversuchsstand, Randschalung für Fußbodenaufbauten .....	6-16
Abbildung 6-25	Großer Deckenversuchsstand, Randschalung für Fußbodenaufbauten, Detail..	6-16
Abbildung 6-26	L-0 Holzbalkendecke als Rohdecke im Großen Deckenversuchsstand.....	6-17
Abbildung 6-27	L-0 Holzbalkendecke als Rohdecke mit Schwellhölzern im Großen Deckenversuchsstand .....	6-17
Abbildung 6-28:	Querschnitt Versuchsaufbau TES .....	6-18
Abbildung 6-29:	Querschnitt Versuchsaufbau NES .....	6-18
Abbildung 6-30	Biegeversuch .....	6-23
Abbildung 6-31	Messstellen Belastungsversuche .....	6-25
Abbildung 6-32	montierter Seilzugaufnehmer.....	6-25
Abbildung 6-33	Wegaufnehmer misst Relativverschiebung zwischen Estrichplatte und Holz....	6-25

Abbildung 6-34	Messeinrichtung zur Ermittlung der Dehnungsverteilung.....	6-25
Abbildung 6-35	Messbasis mit DMC plus Messkraftverstärker .....	6-25
Abbildung 6-36	Querschnitt Brettsper Holzplatte.....	6-26
Abbildung 6-37	Kraft - Weg - Diagramme aller Versuchsaufbauten .....	6-29
Abbildung 6-38	Dehnungsverteilung mit Unterhangdecke an Sparschalung.....	6-30
Abbildung 6-39	Versuchsstand zur Ermittlung der Materialdämpfung .....	6-32
Abbildung 6-40	Versuchsstand zur Ermittlung der Materialdämpfung mit Shaker, am Beispiel Split .....	6-33
Abbildung 6-41	Versuchsstand zur Ermittlung der Materialdämpfung mit Impulshammer, am Beispiel Wabe.....	6-33
Abbildung 6-42	Anhydrit- Estrich- Zylinder, d = 150 mm“ .....	6-35
Abbildung 6-43	Anhydrit- Estrich- Prismen.....	6-35
Abbildung 7-1	1. und 15. Eigenform der FEM-Modells des 1. Versuchstandes als Rohdecke mit Eigenfrequenzen von ca. 16 Hz bzw. 62 Hz .....	7-1
Abbildung 7-2	Eigenfrequenzen der ersten 20 berechneten Moden und der ersten 8 gemessenen Moden.....	7-2
Abbildung 7-3	Ergebniskurven für die erste Eigenfrequenz aus der Variation der E-Moduln und Massen der Holzbalken.....	7-3
Abbildung 7-4	Ergebnisse für die erste Eigenfrequenz nach Modellierung von Auflagerausfällen unterschiedlich vieler Balken .....	7-3
Abbildung 8-1	Modell 1 zur Auswertung mit dem „Solver“ .....	8-2
Abbildung 8-2	Modell 1-1 zur Auswertung mit dem „Solver“ .....	8-2
Abbildung 8-3	Modell 2 zur Auswertung mit dem „Solver“ .....	8-3
Abbildung 8-4	Modell 3 zur Auswertung mit dem „Solver“ .....	8-3
Abbildung 8-5	Modell 4 zur Auswertung mit dem „Solver“ .....	8-4
Abbildung 8-6	Modell 4-1 zur Auswertung mit dem „Solver“ nur für Decken mit Nassestrich.....	8-4
Abbildung 8-7	Modell 4-1 zur Auswertung mit dem „Solver“ nur für Decken mit Trockenestrich	8-5
Abbildung 8-8	Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung und gemessener Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Konstruktionsart .....	8-7
Abbildung 8-9	Zusammenhang zwischen subjektiver Bewertung und berechneter Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Konstruktionsart .....	8-8
Abbildung 8-10	Vergleich zwischen berechneter und gemessener Eigenfrequenz zwischen subjektiver Bewertung und gemessener Eigenfrequenz unter Berücksichtigung der Konstruktionsart.....	8-9
Abbildung 8-11	Zusammenhang zwischen Bewertung und Durchbiegung unter einer mittigen Einzellast von 1 kN berechnet für einen Deckenstreifen mit b=1m .....	8-11
Abbildung 8-12	Zusammenhang zwischen Bewertung und Durchbiegung unter einer mittigen Einzellast von 1 kN berechnet für einen Deckenstreifen mit b=1m unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Estrichs.....	8-12
Abbildung 8-13	Zusammenhang zwischen Bewertung und Durchbiegung unter einer mittigen Einzellast von 1 kN berechnet für einen Deckenstreifen mit $b_{eff}$ unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit des Estrichs.....	8-14
Abbildung 8.14:	Anregung von unten durch Faustschlag .....	8-18
Abbildung 8.15:	Frequenzauswertung Versuchsaufbau 5 .....	8-19

Abbildung 8.16: anregende Person steht auf Zehenspitzen .....	8-20
Abbildung 8.17: Beschleunigung nach Heeldrop (ungefiltert) .....	8-20
Abbildung 8.18: Beschleunigung (links) und FFT-Analyse (rechts) infolge Gehen mit 3 Hz.....	8-21
Abbildung 8.19: Shaker .....	8-22
Abbildung 8.20: Ein- und Ausschwingvorgang des Shakers.....	8-22
Abbildung 8-21 Zusammenstellung aller gemessenen Eigenfrequenzen und die zugehörigen subjektiven Bewertungen.....	8-24
Abbildung 8.22: Frequenzbereich (links) und gefilterte Beschleunigung (rechts).....	8-28
Abbildung 8-23 Zusammenstellung des Einflusses der Lagerung auf die Dämpfung .....	8-30
Abbildung 9-1 Vorschlag für den Ablauf des Schwingungsnachweises im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	9-2
Abbildung 9-2 Einfeldträger: Schwingungen in der ersten Eigenfrequenz und Querschnitt.....	9-6
Abbildung 9-3 Zusammenhang zwischen der Frequenz und der abgegebenen Kraft beim Gehen .....	9-8
Abbildung 9-4 Zusammenhang zwischen der Durchbiegung $w(2 \text{ kN})$ und der Bewertung bei den untersuchten Decken.....	9-9
Abbildung 9-5 Ersatzsystem für nachgiebig gelagerte Decken .....	9-11
Abbildung 9-6 Schematische Darstellung der Lagerung von Holzträgern auf Unterzügen .....	9-12
Abbildung 9-7 Überlegungen zur Anwendung der Überlagerungsformel nach Dunkerley .....	9-14
Abbildung 9-8 Erste Eigenform der Decke gesamt sowie eines einzelnen Holzträgers je nach Steifigkeit des Unterzugs .....	9-15
Abbildung 10-1 Skizze des Erdgeschosses und der Decke über EG der BSP- Decke.....	10-1
Abbildung 10-2 Eigenform der Schwingungen mit der 1. Eigenfrequenz berechnet mit FE-Programm .....	10-2
Abbildung 10-3 Berechnung der Durchbiegung unter Einzellast am Ersatzsystems des Einfeldträgers.....	10-3

## 15 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1	Bewertungskriterien (subjektiv) nach [Kreuzinger/ Mohr, 1999] .....	1-6
Tabelle 1-2	Übersicht über im Labor durchgeführte Versuche .....	1-7
Tabelle 2-1	Schrittfrequenzen, Fourierkoeffizienten und Phasenverschiebung, siehe [Bachmann; 1997] .....	2-15
Tabelle 3-1	Gegenüberstellung [DIN 1052] und [Eurocode 5] .....	3-11
Tabelle 3-2	Grenzwerte für Untersuchung zur Steifigkeit .....	3-15
Tabelle 4-1	Überblick über Personen-Induzierte Anregungen .....	4-2
Tabelle 4-2	Bewertungsstufen und Bewertungskriterien.....	4-3
Tabelle 4-3	Eigenlast und Verkehrslast für „übliche“ Decken .....	4-4
Tabelle 4-4	Aufbau der Schwingungsstege von oben nach unten:.....	4-5
Tabelle 4-5	Zusammenhang zwischen Nutzung und Bewertung (subjektiv) .....	4-7
Tabelle 5-1	Übersicht über die in-situ-Messobjekte und -Messungen .....	5-3
Tabelle 6-1	Übersicht über untersuchte Decken .....	6-7
Tabelle 6-2	Übersicht über untersuchte Lagerungsvarianten .....	6-11
Tabelle 6-3	Übersicht über untersuchte Ausbaukonstruktionen .....	6-15
Tabelle 6-4	Übersicht über verwendete Materialien (Fußbodenaufbauten).....	6-16
Tabelle 6-5	Bewertung, Eigenfrequenzen und Dämpfung der ersten Eigenfrequenz.....	6-21
Tabelle 6-6	Bewertung (auch in Worten), Eigenfrequenz und Massen der untersuchten Decken .....	6-22
Tabelle 6-7	Messtechnik.....	6-24
Tabelle 6-8	Versuchsprogramm Kleiner Deckenversuchsstand .....	6-27
Tabelle 6-9	Effektive Biegesteifigkeiten $(E \cdot I)_{\text{exp}}$ .....	6-28
Tabelle 6-10	Auswertung für Einzelschichten .....	6-29
Tabelle 6-11	Nichtakustische Eigenschaften der getesteten Materialien (200 mm x 200 mm).....	6-32
Tabelle 6-12	Verlustfaktor und dynamische Steifigkeit der getesteten Materialien, Messung mit Shaker .....	6-33
Tabelle 6-13	Verlustfaktor und dynamische Steifigkeit der getesteten Materialien, Messung mit Impulshammer.....	6-34
Tabelle 6-14	Ermittlung E-Modul Anhydrit- Estrich nach DIN 18555-4.....	6-36
Tabelle 6-15	Materialkennwerte Holzbalken (Großer Deckenversuchsstand).....	6-37
	<i>Tabelle 8.1: Eigenfrequenzen Versuchsaufbau 5</i> .....	8-20
Tabelle 8-2	Dämpfungswerte für unterschiedliche Aufbauten und Lagerungen der Holzbalkendecke (großer Deckenversuchsstand) .....	8-29
Tabelle 8-3	Dämpfungswerte für unterschiedliche Holzdecken .....	8-32
Tabelle 8-4	Einfluss der untersuchten Elemente auf das Schwingungsverhalten von Decken . 8-33	
Tabelle 8-5	Einfluss der untersuchten Elemente auf das Schwingungsverhalten von Decken, verbal.....	8-34
Tabelle 9-1	Zusammenhang zwischen subjektiven Bewertungen und Nutzung bzw. Einbaulage .....	9-3
Tabelle 9-2	Konstruktive Maßnahmen in Abhängigkeit von den Anforderungen an das Schwingungsverhalten .....	9-4

