

Lehrstuhl für Baumechanik  
Technische Universität München

## **Untersuchungen zum Schwingungsverhalten leichter Verbunddeckensysteme**

Zusammenstellung von Masterarbeiten im Studiengang  
Bauingenieurwesen  
Vertiefungsrichtung Baumechanik

Herausgeber : Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Müller  
Dipl.-Ing. Martin Buchschmid

Autoren : Ludwig Angerer M.Sc.  
Martin Dengler M.Sc.  
Mathias Kohrmann M.Sc.  
María José Puñet Corvillo M.Sc.  
Claus Reuter M.Sc.

Co-Autoren : Dipl.-Ing. Johannes Kreutz  
Dipl.-Ing. Katrin Runtemund  
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Trometer M.Eng.



Schriftenreihe des Lehrstuhls für Baumechanik

Band 7

**Gerhard Müller  
Martin Buchschmid (Hrsg.)**

**Untersuchungen zum Schwingungsverhalten  
leichter Verbunddeckensysteme**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0154-9

ISSN 1864-1806

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

# Vorwort

Die Verwendung leichter Verbunddeckensysteme bietet neue Möglichkeiten für ressourcenschonende und wirtschaftliche Gebäudestrukturen. Dabei können die verwendeten Materialien hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit optimal ausgenutzt werden. Die „richtigen“ Materialien werden an der jeweils „richtigen“ Stelle eingesetzt. Damit ergeben sich im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit unter dynamischen Anregungen zusätzliche Aufgabenstellungen. Im Gegensatz zu konventionellen Stahlbetondeckensystemen, bei denen die durch Fußgänger induzierten dynamischen Kräfte keine spürbaren Schwingungen auslösen, sind bei den höher beanspruchten weitgespannten leichten Konstruktionen diese Phänomene nicht auszuschließen. Die Bearbeitung der Fragestellungen

- Wie ist das System möglichst einfach zu modellieren?
- Wie sind die dynamischen Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Systemen?
- Wie können nachträglich Schwingungstilger angebracht werden?
- Wie ist die Last zu modellieren, wenn bei Versammlungsstätten oder großen öffentlichen Gebäuden Gruppen von Personen, die in mehr oder weniger unregelmäßiger Folge das Tragwerk begehen?
- Wie kann man mit vereinfachten Systembeschreibungen dem planenden Ingenieur eine Handreichung geben?
- Wie gut passen Realität und Prognose zusammen?

würde den Umfang einer einzelnen Masterarbeit bei Weitem übersteigen.

Auf Anregung von Prof. Martin Mensinger wurden im Rahmen eines fächerübergreifenden Projektes zusammen mit dem Lehrstuhl für Metallbau der TU München fünf Masterarbeiten angefertigt, in denen die genannten Fragestellungen am Beispiel eines auf schlanken Verbundträgern der H. Wetter AG in Stetten basierenden Tragwerkskonzeptes untersucht wurden. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden in dieser Veröffentlichung zusammengefasst. Sie behandeln Mechanismen der Anregung durch Fußgänger ebenso wie Fragestellungen der

---

Modellierung mit Finiten Elementen oder Substrukturformulierungen über Impedanzansätze. Es wird die Kalibrierung der Modelle mithilfe von dynamischen Messungen an der realen Struktur erörtert und es werden die Hintergründe der messtechnischen Verfahren diskutiert. Für diesen Verbundträger wurden Schwingungstilger im numerischen Modell konzipiert, für die reale Struktur konstruiert und mithilfe von Messungen auf den Träger abgestimmt. Die Wirkungsweise dieser Schwingungsschutzsysteme wird detailliert untersucht. Für die Untersuchung des bauakustischen Verhaltens der Struktur werden verschiedene Systeme von abgehängten Decken modelliert und es wird deren charakteristisches Abstrahlverhalten diskutiert.

Durch die Unterstützung der H. Wetter AG, der Gerb GmbH & Co. KG, der Getzner GmbH und der Müller-BBM VibroAkustik Systeme GmbH konnten die Arbeiten mit realistischen Materialien, üblichen Tilgersystemen und kommerzieller Mess- und Analyse-Software durchgeführt werden. Den beteiligten Firmen, aber vor allem den Autoren sei hiermit herzlichst gedankt. Besonderer Dank gilt Herrn Mathias Kohrman und Herrn Martin Dengler für die Überarbeitung des gesamten Bandes.

Das Format von eigenständigen, aber in ihrer Themenstellung zusammenhängenden Arbeiten, ermöglicht den Beteiligten wissenschaftlich in die Tiefe zu gehen und darüber auch das Lernen, Hinterfragen und Kommunizieren im Team nicht zu vernachlässigen. Es hat sich, wie das Ergebnis zeigt, bewährt.

München im April 2011

Gerhard Müller  
Martin Buchschmid

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Erläuterung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Systembeschreibung</b>	<b>4</b>
2.1	Beschreibung der Messaufbaus . . . . .	4
2.2	Deckensystem . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Modellierung des Verbundträgers</b>	<b>8</b>
3.1	Analytische Lösung mit Maple . . . . .	8
3.2	Modellierung mit der FEM . . . . .	9
3.2.1	Modellierung der Stahlträger . . . . .	9
3.2.2	Modellierung der Betonplatte . . . . .	10
3.2.3	Modellierung der Lagerung . . . . .	12
3.3	Berechnung der Eigenformen und Eigenfrequenzen . . . . .	12
3.4	Ergebnisszusammenstellung . . . . .	14
<b>II</b>	<b>Experimentelle Modalanalyse</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>18</b>
4.1	Modalanalyse . . . . .	18
4.1.1	Herleitung der Bewegungsgleichungen . . . . .	18
4.1.2	Bestimmung der Eigenwerte am Ungedämpften System . . . . .	19
4.1.3	Bestimmung der generalisierten Größen . . . . .	20
4.2	Experimentelle Modalanalyse . . . . .	22
4.2.1	Frequenzgänge . . . . .	22
4.2.2	Ermittlung der Modalen Parameter aus der Ortskurve . . . . .	24
4.2.3	Begrenzter Frequenzbereich . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Beispiele mit Simulink</b>	<b>28</b>
5.1	Programmbeschreibung . . . . .	28
5.2	Beispiel 1 . . . . .	29
5.2.1	Modell . . . . .	29
5.2.2	Zeitbereich . . . . .	32
5.2.3	Darstellungsmöglichkeiten im Frequenzbereich . . . . .	32
5.2.4	Parameterbestimmung bei einem Einfreiheitsgradsystem . . . . .	32

5.3	Beispiel 2 . . . . .	38
5.3.1	Analytische Modalanalyse mit Maple . . . . .	39
5.3.2	Experimentelle Modalanalyse mit Simulink . . . . .	41
5.4	Beispiel 3 . . . . .	49
5.4.1	Experimentelle Modalanalyse mit Simulink . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Simulation mit Ansys . . . . .</b>	<b>53</b>
6.1	Systemanalyse . . . . .	53
6.1.1	Modalanalyse . . . . .	53
6.1.2	Harmonische Frequenz Analyse . . . . .	54
6.1.3	Frequenzgänge . . . . .	58
6.1.4	Auswertung . . . . .	59
6.1.5	Superposition und Vergleich der Ergebnisse . . . . .	66
6.1.6	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	66
<b>7</b>	<b>Ermittlung der Frequenzgänge . . . . .</b>	<b>70</b>
7.1	Anregungsarten . . . . .	71
7.2	Vermeidung von Messfehlern . . . . .	72
7.3	Ablauf einer Frequenzgang Ermittlung . . . . .	73
<b>8</b>	<b>Messeinrichtung, Messgeräte und Software . . . . .</b>	<b>74</b>
8.1	Messeinrichtung . . . . .	74
8.2	Messgeräte . . . . .	76
8.2.1	Beschleunigungsaufnehmer . . . . .	76
8.2.2	Kraftaufnehmer . . . . .	76
8.2.3	Schwingerreger und Verstärker . . . . .	77
8.2.4	Verbindungskonstruktion . . . . .	77
8.2.5	Messverstärker . . . . .	78
8.2.6	Datenerfassungsgerät . . . . .	78
8.3	Software . . . . .	79
8.3.1	Messdatenerfassung . . . . .	79
8.3.2	Signalgenerator . . . . .	79
<b>9</b>	<b>Messung am Deckenelement . . . . .</b>	<b>80</b>
9.1	Messtechnische Voruntersuchungen . . . . .	80
9.1.1	Ablauf . . . . .	80
9.1.2	Ergebnisse . . . . .	81
9.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	83
9.1.4	Wahl der Moden und Messstellen für die Experimentelle Modalanalyse . . . . .	84
9.2	Experimentelle Modalanalyse . . . . .	85
9.2.1	Durchführung der Messungen . . . . .	85
9.2.2	Frequenzgänge . . . . .	86
9.2.3	Auswertung . . . . .	88
9.2.4	Superposition und Vergleich der Ergebnisse . . . . .	96
9.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	96



<b>10 Kontrollmessung mit kommerzieller Messsoftware</b>	<b>100</b>
10.1 Messablauf . . . . .	100
10.2 Messgeräte . . . . .	101
10.2.1 Beschleunigungsaufnehmer . . . . .	101
10.2.2 Impulshammer . . . . .	102
10.2.3 Messsystem . . . . .	102
10.3 Messsoftware . . . . .	103
10.4 Frequenzgänge . . . . .	103
10.5 Auswertung . . . . .	105
10.5.1 Eigenfrequenzen und Dämpfungsparameter . . . . .	106
10.5.2 Eigenschwingformen . . . . .	106
10.6 Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse . . . . .	107
<b>11 Zusammenfassung</b>	<b>109</b>
11.1 Ausblick . . . . .	110
<b>III Stochastische Anregung</b>	<b>111</b>
<b>12 Die Fußgängerlast</b>	<b>112</b>
12.1 Biomechanik des Gehens und Laufens . . . . .	112
12.2 Lastmodelle . . . . .	115
12.2.1 Fourierreihenansatz . . . . .	115
12.2.2 Schritt-für-Schritt-Modell . . . . .	117
<b>13 Belastung durch einen Fußgänger</b>	<b>120</b>
13.1 Versuchsdurchführung . . . . .	120
13.2 Transiente dynamische Analyse . . . . .	121
13.2.1 Die Methode der modalen Superposition . . . . .	122
13.2.2 Generierung der Last-Zeit-Funktion . . . . .	122
13.2.3 Auswertung der Ergebnisse . . . . .	126
13.3 Ergebniszusammenstellung . . . . .	126
<b>14 Untersuchungen eines stationären Fußgängerstroms</b>	<b>134</b>
14.1 Versuchsdurchführung . . . . .	134
14.2 Numerische Modellierung . . . . .	135
14.2.1 Übersicht über die stochastischen Merkmale . . . . .	135
14.2.2 Entwicklung der spektralen Last . . . . .	136
14.2.3 Lösung der Tragwerksantwort im Frequenzraum . . . . .	137
14.2.4 Leistungsspektraldichte-Methode . . . . .	139
14.3 Auswertung der Ergebnisse . . . . .	142
<b>15 Analyse der Kopplungseffekte hervorgerufen durch stehende Menschen</b>	<b>146</b>
15.1 Dynamische Charakteristiken des menschlichen Körpers . . . . .	146
15.2 Analyse von Kopplungseffekten am Trägerelement . . . . .	147
15.2.1 Frequenzganganalyse des gekoppelten Systems . . . . .	147

15.2.2	Analyse der Kopplungseffekte aus der Versuchsdurchführung . . . . .	150
15.3	Anmerkungen zu den Ergebnissen . . . . .	154
<b>16</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>155</b>
<b>IV</b>	<b>Tilgerbemessung</b>	<b>157</b>
<b>17</b>	<b>Messung des Verbundträgers</b>	<b>158</b>
<b>18</b>	<b>Einsatzbereiche und Bemessung von Schwingungstilgern</b>	<b>162</b>
18.1	Einsatzbereiche von Tilgern . . . . .	162
18.2	Zweimassenschwinger . . . . .	163
18.3	Optimierungskriterien nach den Harthog . . . . .	167
18.3.1	Masseverhältnis . . . . .	170
18.3.2	Verstimmung . . . . .	170
18.3.3	Dämpfungsgrad des Tilgers . . . . .	172
18.3.4	Dämpfungsgrad des Hauptsystems . . . . .	173
18.4	Berechnung der modalen Masse . . . . .	176
18.5	Ablauf einer Tilgerbemessung . . . . .	177
<b>19</b>	<b>Tilger mit Sylomer-Elementen</b>	<b>178</b>
19.1	Modale Massen . . . . .	178
19.2	Abstimmung der Tilger . . . . .	180
19.3	Konstruktion der Tilger . . . . .	181
19.4	Eigenschaften der gewählten Tilgerkonstruktion . . . . .	184
19.4.1	Schwingformen der Tilger . . . . .	184
19.4.2	Nichtlinearität der Feder . . . . .	184
19.5	Abstimmung im eingebauten Zustand . . . . .	186
19.6	Erwartete Verbesserung durch die Tilger . . . . .	187
19.6.1	Biegetilger . . . . .	187
19.6.2	Torsionstilger . . . . .	188
<b>20</b>	<b>Abstimmung der Tilger auf den Verbundträger</b>	<b>189</b>
20.1	Biegetilger . . . . .	189
20.1.1	Spektren und Pegeldifferenz des Biegetilgers . . . . .	189
20.1.2	Dämpfung der Biegemode mit Tilger . . . . .	191
20.2	Torsionstilger . . . . .	192
20.2.1	Spektren und Pegeldifferenz der Torsionstilger . . . . .	192
20.2.2	Dämpfung der Torsionsmode mit Tilgern . . . . .	194
20.3	Abstimmung bei Veränderung der Anregung . . . . .	195
20.4	Interaktion der Tilger . . . . .	195
20.4.1	Berechnung der Interaktion . . . . .	196
20.4.2	Messung der Interaktion . . . . .	199
20.4.3	Beste Abstimmung für beide Eigenformen . . . . .	200

<b>21 Tilger mit Schraubenfedern</b>	<b>201</b>
21.1 Modale Masse . . . . .	201
21.2 Abstimmung des Tilgers . . . . .	201
21.3 Konstruktion des Tilgers . . . . .	202
21.4 Erwartete Verbesserung der Schwingungseigenschaften . . . . .	204
21.5 Gemessene Spektren und Pegeldifferenzen . . . . .	204
<b>22 Numerische Berechnung des Verbundträgers mit Tilgern</b>	<b>211</b>
<b>23 Ein- und Ausschwingvorgang</b>	<b>215</b>
23.1 Transiente Belastung . . . . .	215
23.2 Harmonische Anregung . . . . .	215
<b>24 Belastung durch Fußgänger</b>	<b>220</b>
24.1 Belastung durch eine Person . . . . .	220
24.2 Belastung durch einen Fußgängerstrom . . . . .	224
24.3 Wirksamkeit der Tilger bei Zusatzbelastung . . . . .	231
<b>25 Zusammenfassung</b>	<b>235</b>
<b>V Impedanzansätze</b>	<b>239</b>
<b>26 Theoretische Einführung zur mechanischen Impedanz</b>	<b>240</b>
26.1 Impedanzmodell eines einfachen Systems . . . . .	243
26.2 System mit Kopplung einer Verschiebung . . . . .	243
26.2.1 Gesamtsystem . . . . .	243
26.2.2 Ersatzsystem mit Anschlussimpedanz . . . . .	251
26.2.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse . . . . .	256
26.3 Ergänzung: Kopplung einer Rotation . . . . .	257
26.3.1 Gesamtsystem . . . . .	257
26.3.2 Ersatzsystem mit Anschlussimpedanz . . . . .	259
26.3.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse . . . . .	266
<b>27 Impedanzenmodell eines Verbunddeckensystems</b>	<b>268</b>
27.1 Ermittlung der Impedanz . . . . .	268
27.1.1 Direkte Berechnung mit ANSYS . . . . .	268
27.1.2 Berechnung mithilfe der Modalanalyse mit MATLAB . . . . .	270
27.1.3 Vergleich der zwei Methoden . . . . .	275
27.2 Modell mit drei Trägern und Impedanzenmodell . . . . .	278
27.2.1 Modell mit drei Trägern . . . . .	279
27.2.2 Modell mit Impedanzen . . . . .	279
27.2.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse . . . . .	281
27.3 Untersuchungen am Modell mit Anschlussimpedanzen . . . . .	287
27.3.1 Einfluss der Nachbarträger und Berechnung der Fehlerkraft . . . . .	287
27.3.2 Impedanzmodell unter mehreren gleichfrequenten Lasten . . . . .	290

27.3.3	Entwicklung der Impedanz mit der Frequenz . . . . .	291
27.3.4	Entwicklung der Impedanz bei wachsender Anzahl an Trägern . . . . .	294
27.4	Analyse des Impedanzmodells für komplexe Systeme . . . . .	298
<b>28</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>304</b>
<b>VI</b>	<b>Akustisches Abstrahlverhalten</b>	<b>305</b>
<b>29</b>	<b>Akustische Grundlagen</b>	<b>306</b>
29.1	Einführung . . . . .	306
29.2	Intensität und Schalleistung . . . . .	307
29.3	Abstrahlgrad und Abstrahlmaß . . . . .	310
<b>30</b>	<b>Problemformulierung</b>	<b>312</b>
30.1	Randelementemethode . . . . .	312
30.2	FE-Modell des Verbundträgers mit abgehängter Decke . . . . .	313
30.2.1	Modellierung des Verbundträgers . . . . .	313
30.2.2	Modellierung der abgehängten Decke . . . . .	313
<b>31</b>	<b>Ergebniszusammenstellung</b>	<b>317</b>
31.1	Verbundträger ohne abgehängter Decke . . . . .	317
31.2	Verbundträger mit abgehängter Decke . . . . .	321
31.2.1	Variante a . . . . .	322
31.2.2	Variante b . . . . .	324
31.2.3	Variante c . . . . .	326
<b>32</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>328</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>330</b>