

Fussgängerinduzierte Deckenschwinungen

Autor(en): **Maier, Claus**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tec21**

Band (Jahr): **133 (2007)**

Heft 13: **Schwingungen**

PDF erstellt am: **22.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-108095>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

FUSSGÄNGERINDUZIERTE DECKENSCHWINGUNGEN

Die Berechnung der Schwingungsanfälligkeit von weitgespannten Deckensystemen durch gehende Personen kann nach dem heutigen Stand der Technik zu unwirtschaftlichen Bauteilabmessungen führen, da das tatsächliche System sich anders verhält, als es mit Hilfe von einfachen Modellen angenommen wird. Der Autor stellt die Grundlage für zwei Berechnungsmodelle vor, um wirtschaftliche Lösungen zu finden.

Unter bestimmten Voraussetzungen werden Schwingungen von Deckenkonstruktionen im Hochbau durch gehende Personen hervorgerufen, die von den Nutzern deutlich wahrgenommen und als störend empfunden werden. Bei gewerblichen Nutzungen bestehen besondere Anforderungen an eine vibrationsarme Deckenkonstruktion, sofern das Aufstellen von Geräten oder Maschinen geplant ist, die mit hoher Präzision arbeiten. Zu den Voraussetzungen, die eine hohe Schwingungsanfälligkeit implizieren, gehören ein geringes Verhältnis zwischen Biegesteifigkeit und Massenbelegung sowie eine geringe Masse und Systemdämpfung. In diesen Fällen wird in der Regel nicht mehr die Tragfähigkeit, sondern die Schwingungsanfälligkeit zum massgebenden Lastfall für die Auslegung des Bauteils. Unter diesen Bedingungen wird ein Modell zur Berechnung der durch Fussgänger induzierten Deckenschwingungen benötigt, anhand dessen die auftretenden Schwingungsgrössen realistisch prognostiziert werden, um eine wirtschaftlich und architektonisch sinnvolle Deckenkonstruktion zu erhalten.

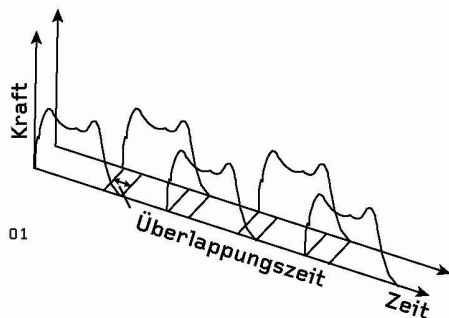
STAND DER TECHNIK

Die derzeitige Vorgehensweise zur Beschränkung der Schwingungsanfälligkeit eines weitgespannten Deckensystems erfolgt entweder durch eine Frequenzabstimmung der Konstruktion oder über eine Begrenzung der Schwingungen mittels dynamischer Berechnung infolge einer idealisierten Anregung durch gehende Personen.

Bei einer Frequenzabstimmung wird die tiefste Eigenfrequenz der Konstruktion so ausgelegt, dass sie grösser ist als die Anregungsfrequenzen, die durch die periodisch wiederkehrenden Kräfte gehender Personen entstehen. Der Berechnung der tiefsten Eigenfrequenz werden vereinfachte Systeme zugrunde gelegt, beispielsweise für eine Verbundträgerdecke das System des Einfeldträgers mit einer Systembreite, die dem Abstand der Träger untereinander entspricht. Mit Hilfe dieser Berechnung wird die tiefste Eigenfrequenz auf eine Zielfrequenz abgestimmt. Dieses Vorgehen ist in der Regel weder aus architektonischer noch aus wirtschaftlicher Sicht befriedigend, da es zu einer unwirtschaftlichen Systemauslegung führt, sofern die Schwingungsanfälligkeit auch mit einer schlankeren Konstruktion gewährleistet werden könnte. Aufgrund der Vernachlässigung von Masse und Dämpfung können aber auch nicht auf der sicheren Seite liegende Systemauslegungen erfolgen.

Soll eine Begrenzung der Schwingungen mittels dynamischer Berechnung erfolgen, setzt die übliche Modellbildung eine idealisierte dynamische Kraft stellvertretend für die Anregung durch gehende Personen auf das vorliegende System an. Dieses Vorgehen ist für die Systemauslegung zu bevorzugen, da es eine Grösse über die auftretenden Schwingungsamplituden liefert, sofern

Titelbild:
Wellenförmige Bewegungen
(KEYSTONE / Science Photo Library SPL / Lawrence Lawry)



in die Berechnung realistische Ansätze eingehen. Den auftretenden Schwingungsamplituden werden nachfolgend der Nutzung entsprechende maximal zulässige Schwingungsamplituden gegenübergestellt.

Die überwiegende Zahl der in der Literatur vorliegenden Berechnungsansätze zur Bestimmung der maximalen fussgängerinduzierten Deckenschwingsbeschleunigung a_{Peak} basieren auf der Berechnung einer resonanten, harmonisch angeregten Schwingung der ersten Eigenfrequenz des Systems aufgrund einer dynamischen Kraftkomponente $\alpha_n G_0$. Die Kraftkomponente setzt sich zusammen aus der so genannten Harmonischen und der statisch wirksamen Eigengewichtskraft (i. M. $G_0 = 800 \text{ N/Person}$), die der Anregung einer gehenden Person bzw. mehrerer gehender Personen entspricht. Die Berechnungsansätze können im Wesentlichen auf die folgende Gleichung zurückgeführt werden:

$$a_{\text{Peak}} = \frac{\alpha_n G_0}{2\zeta \cdot M} \cdot R \quad \text{Gleichung A}$$

Die Genauigkeit der Prognose der Schwingungsantwort auf eine oder mehrere Personen ist von zwei Einflüssen geprägt: der Zuverlässigkeit der Annahme der dynamischen Systemparameter – modale Masse M und modale Dämpfung ζ – im Gebrauchszustand des Systems und dem realitätsnahen Ansatz der Anregung durch die dynamische Kraftkomponente $\alpha_n G_0$.

Beim Gehen werden massgeblich in vertikaler Richtung Kräfte bei der vorherrschenden Schrittfrequenz f_s und deren Vielfachen auf die Unterlage abgegeben (Bild 1). Die Schrittfrequenz beträgt beim Gehen zwischen 1.7 Hz und 2.3 Hz.³ Aufgrund vieler Ursachen, wie beispielsweise unterschiedliche Gehstile der Personen, benutztes Schuhwerk, Beschaffenheit der Unterlage und geringfügige Veränderung der Schrittfrequenz während des Gehens, streuen die Kräfte in Grösse und Frequenz stark. Diese Streuung kann auf Grundlage der Untersuchung von Kerr⁴ mit dem Variationskoeffizienten v_E , dem Mittelwert μ_E und einem 95-%-Fraktilwert gemäss Tabelle 2 beschrieben werden. In Tabelle 2 werden die ersten vier Harmonischen angegeben, mit denen die Kraft-Zeit-Funktion $P(t)$ in vertikaler Richtung ausreichend genau formuliert wird (ϕ_n ist dabei die Phasenverschiebung der Harmonischen):

$$P(t) = G_0 \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \sin(2\pi n f_s t - \phi_n) \right) \quad \text{Gleichung B}$$

Harmon. α_n	Anregungsfrequenzbereich f	Variationsk. v_E [–]	Mittelwert μ_E [–]	95-%-Fraktilwert [–]
α_1	1.0 Hz–2.8 Hz	0.17	$0.37(f_s - 0.95) \leq 0.5$	$0.37(f_s - 0.82) \leq 0.55$
α_2	2.0 Hz–5.5 Hz	0.4	0.070	0.12
α_3	3.0 Hz–8.4 Hz	0.4	0.055	0.09
α_4	4.0 Hz–11.2 Hz	0.4	0.050	0.08

01 Vertikale Kraft-Zeit-Funktion einer gehenden Person² (Bilder: Maier)

02 Streuung der vertikalen Kraftanregung beim Gehen einer Person für die ersten vier Harmonischen α_n basierend auf Kerr⁴

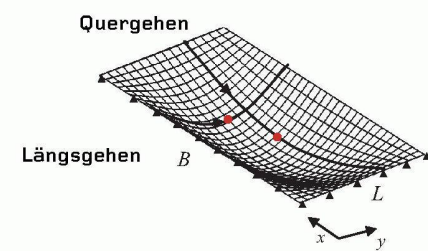
02

Definition Root-Mean-Square (RMS)-Wert

$$a_{rms} = \left[\frac{1}{t_w} \int_0^{t_w} [a(t)]^2 dt \right]^{1,2}$$

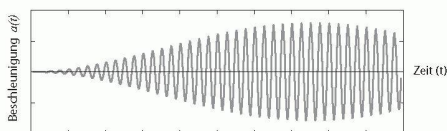
Für eine Schwingung mit unveränderlicher maximaler Amplitude gilt:

$$a_{rms} = a_{peak} / \sqrt{2}$$

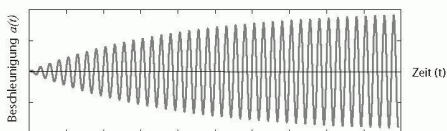


- **Anregungsstelle A mit $\phi_{i,A}(x,y)$ der i-ten Eigenform**

03



04



05

- 03 Pfade gehender Personen in Längs- und Querrichtung auf einer Deckenplatte dargestellt anhand der ersten Schwingungsform
- 04 Schwingung eines Einmassenschwingers aufgrund einer Anregung durch eine Wanderlast
- 05 Schwingung eines Einmassenschwingers aufgrund einer konstanten harmonischen Anregung

Der Reduktionsfaktor R in Gleichung A mindert die maximale Amplitude des voll eingeschwungenen Zustands entsprechend der Anregungszeit t_w , der Eigenkreisfrequenz ω und der Dämpfung ζ entsprechend Gleichung C ab. Bei der Berechnung des Reduktionsfaktors R wird vereinfachend anstelle der realen örtlich veränderlichen dynamischen Anregung der gehenden Personen von einer stationären Anregung in Feldmitte ausgegangen:

$$R = (1 - e^{-\zeta \omega_i t_w}) \quad \text{Gleichung C}$$

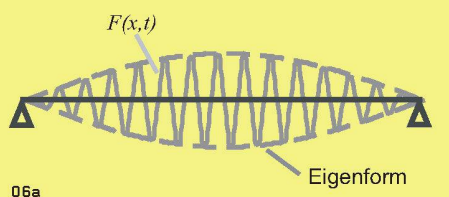
Damit wird die Systemkreisfrequenz ω über die Grösse der Kraftkomponente der gehenden Person und den Reduktionsfaktor R bedeutend. Bei einer Erhöhung der Systemfrequenz nimmt die Grösse der anregenden Kraftkomponente durch den Reduktionsfaktor R zu, vorausgesetzt die Anregungszeit t_w und die Dämpfung ζ verändern sich nicht. Dieser widersprüchliche Effekt wird aber durch die Verminderung der Anregungskraft bei höheren Frequenzen wieder relativiert, da im Allgemeinen die Resonanz mit nur einer Harmonischen und einer Systemfrequenz die höchsten Amplituden hervorruft. Daher wird theoretisch eine Resonanz zwischen der Harmonischen mit der höchsten Kraftkomponente $\alpha_n G_0$ und der Systemfrequenz massgebend, die das geringste Produkt aus Dämpfung ζ und Masse M vorweist. Praktisch spielen jedoch die zweite und die dritte Harmonische die grösste Rolle bei der Anregung von Deckenkonstruktionen, da die Anregungsfrequenz der ersten Harmonischen meist niedriger liegt als die tiefste Systemfrequenz und die vierte Harmonische durch Fussgänger nicht über einen längeren Zeitraum konstant gehalten wird, sodass grössere Schwingungsamplituden durch einen Resonanzzustand nicht auftreten können. Dies ist mit der bereits erwähnten geringfügigen Veränderung der Schritt看quenz beim Gehen begründet, die sich bei den Vielfachen der Schritt看quenz potenziert auswirkt.

MODIFIZIERTER BERECHNUNGSANSATZ

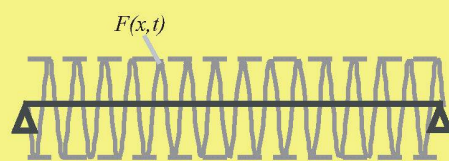
Im Folgenden wird ein modifizierter Berechnungsansatz vorgestellt, der Gleichung A aufnimmt und anstelle der maximal auftretenden Schwingbeschleunigung den Root-Mean-Square (RMS)-Wert benutzt, der als gemittelte Grösse eine geeignetere Grösse für fühlbare Schwingungen darstellt. Des Weiteren werden zwei neue Abminderungsfaktoren ϕ und ein modifizierter Abminderungswert R eingeführt.

$$a_{rms} = \phi_{i,A} \phi_{i,B} \frac{\alpha_n G_0}{2 \zeta_i \cdot M_i} \cdot R \quad \text{Gleichung D}$$

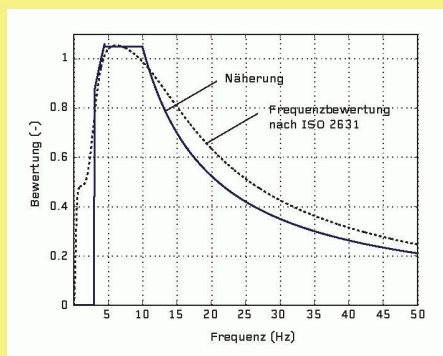
Der Abminderungsbeiwert $\phi_{i,A}(x,y)$ entspricht dabei der maximalen Grösse des normierten Eigenvektors der Eigenfrequenz i entlang des Anregungspfad (Bild 3). Der Wert $\phi_{i,B}(x,y)$ wird durch die Stelle der Beobachtung, d. h. der Wahrnehmung, festgelegt. In dieser Betrachtung wird der Eigenvektor auf 1.0 normiert, sodass gilt $\phi_{i,A} \leq 1.0$ und $\phi_{i,B} \leq 1.0$. Für eine realistische Berechnung der Systemantwort auf eine in Resonanz gehende Wanderlast entlang eines Anregungspfad, wie in Bild 3 gezeigt, ist es wesentlich, die geringere Energieeintragung dieser Wanderlast im Vergleich zu einer stationären Anregung zu berücksichtigen. Die Systemantwort auf eine Wanderlast weist eine charakteristische Umhüllende auf (Bild 4), die sich deutlich von der Umhüllenden unterscheidet, die durch eine stationäre Anregung in Feldmitte erzeugt wird (Bild 5), die der vereinfachten Betrachtung aus Gleichung A zugrunde liegt.



06a



06b



07

Die abweichenden Systemantworten werden durch die in Bild 6 gezeigten unterschiedlichen Anregungsfunktionen hervorgerufen. Die Anregungsfunktion in Bild 6a wird durch die Funktion der Eigenform begrenzt, wodurch deutlich weniger Energie in das System eingetragen wird als bei der konstanten Anregungsfunktion in Bild 6b.

Bei sehr langen Anregungszeiten nimmt die maximale Schwingbeschleunigung in beiden Fällen den gleichen Wert an, während bei kürzeren Anregungen sowohl der RMS-Wert als auch die maximale Schwingbeschleunigung bei der wirklichkeitsnäheren Anregung reduziert werden. Aus diesem Grund wurde ein genaueres Berechnungsverfahren¹ entwickelt, das die Systemantwort eines Einmassenschwingers infolge einer durch eine Sinusfunktion begrenzten Anregungsfunktion auf analytischem Wege berechnet. Die Reduktion der Systemantwort gegenüber einer stationären Anregung findet dabei Eingang in den Abminderungsbeiwert R. Auf die Berechnung kann an dieser Stelle nicht detailliert eingegangen werden. Für eine überschlägige Berechnung kann der Abminderungsfaktor R aber auf der sicheren Seite liegend wie folgt angenommen werden:

$$R \leq \frac{1}{\sqrt{2}} (1 - e^{-\zeta_1 \omega_1 t_w}) \quad \text{Gleichung E}$$

Die Berechnung mit Abminderungsfaktor R aus Gleichung E, der der in Bild 6b gezeigten Anregungsfunktion zugrunde liegt, wird im Folgenden «vereinfachtes Berechnungsverfahren» genannt.

Der RMS-Wert a_{rms} aus Gleichung D wird für beide Berechnungsverfahren mithilfe der Bewertungskurven der ISO 2631-2⁵ (Bild 7) gewichtet. Somit werden die für den Menschen weniger fühlbaren Schwingungen reduziert. Zur Frequenzbewertung können die genauen Abminderungsfaktoren der Richtlinie verwendet werden, oder sie erfolgt alternativ über:

Frequenzen zwischen 3.0 Hz und 4.5 Hz: $a_{rms,w} = a_{rms} \cdot 0.5 \sqrt{f}$

Frequenzen zwischen 4.5 Hz und 10.0 Hz: $a_{rms,w} = 1.05 \cdot a_{rms}$

Frequenzen über 10.0 Hz: $a_{rms,w} = a_{rms} \cdot \frac{10.5}{f}$

GEMESSENE UND BERECHNETE DECKENSCHWINGUNGEN

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden fussgängerinduzierte Schwingungen an Verbundträgerdecken (Bild 10) gemessen. Der Versuchsstand bestand aus zwei übereinander liegenden Einfeld-Verbundträgerdecken mit 15 m Spannweite und einem Trägerabstand von 3 m. Die Dimensionierung der Verbundträger, die nach statischen Gesichtspunkten für Eigenlasten, Techniklasten (3 kN/m²) und Verkehrslasten (5 kN/m²) erfolgte, ergab ein Standardwalzprofil IPE 550 in S355. Aufgrund einer Verstärkung des Zugflansches der unteren Stahlträger mit einer Stahllasche wies die untere Decke etwas höhere Eigenfrequenzen auf. Des Weiteren wurden durch eine Randeinspannung der Deckenträger mithilfe eines Stahlwinkels zwischen Stahlstütze und -träger die Eigenfrequenzen geringfügig variiert.

06 Anregungsfunktion mit sinusförmigen Umhüllenden (a) und konstanter Anregung (b)

07 Vergleich der alternativen Bewertung mit der Frequenzbewertung nach ISO 2631-2

Folgende modalen Parameter wurden durch eine experimentelle Modalanalyse gewonnen:⁶

Bauteil	Gemessene Eigenfrequenz f [Hz]	Lehr'sches Dämpfungsmass [%]	Modale Masse [kg]	Beschreibung
Obere Decke	4.12	0.25	24100	1. Biegeschwingung
	4.56	0.25	9500	Torsionsplattenschwingung
	9.03	0.40	8500	Höhere Plattenschwingung
Untere Decke	4.87	0.25	23900	1. Biegeschwingung
	5.20	0.25	9550	Torsionsplattenschwingung
	9.19	0.40	8600	Höhere Plattenschwingung

08 Modale Parameter der Decken ohne erhöhte Randeinspannung

Bauteil	Gemessene Eigenfrequenz f [Hz]	Lehr'sches Dämpfungsmass [%]	Modale Masse [kg]	Beschreibung
Obere Decke	4.40	0.30	23800	1. Biegeschwingung
	4.81	0.25	9400	Torsionsplattenschwingung
	9.29	0.40	8300	Höhere Plattenschwingung
Untere Decke	5.20	0.30	23200	1. Biegeschwingung
	5.49	0.30	9400	Torsionsplattenschwingung
	9.40	0.40	8400	Höhere Plattenschwingung

09 Modale Parameter der Decken mit erhöhter Randeinspannung

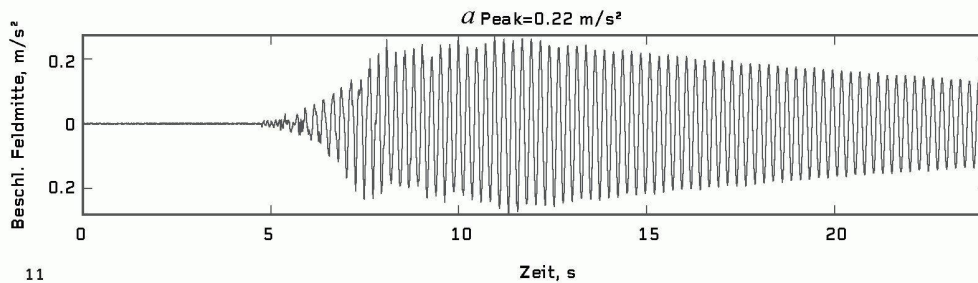


10 Versuchsstand mit zwei übereinander liegenden Verbundträgerdecken (Spannweite 15 m, Trägerabstand 3 m)

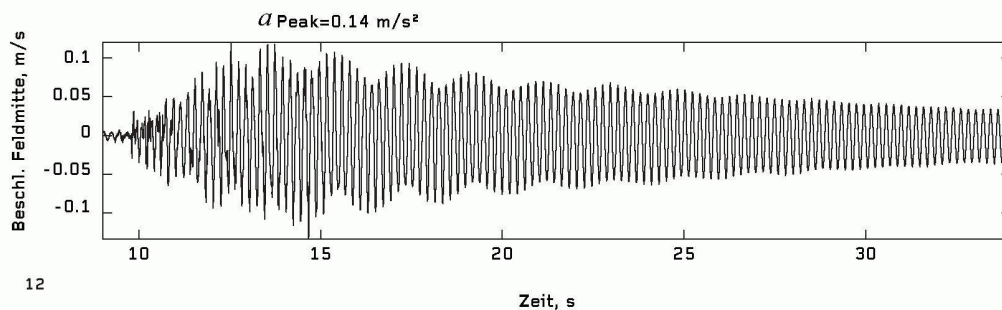
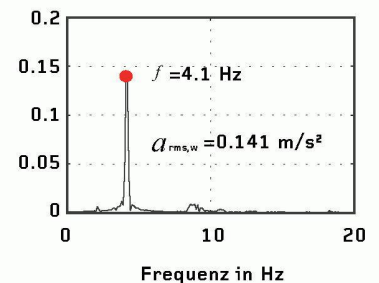
Die Tests zur Bestimmung des massgebenden frequenzbewerteten RMS- Wertes $a_{rms,w}$ bei Anregung durch längs gehende Fussgänger wurden mit einer Person bzw. zwei Personen ($G_0 \approx 800 \text{ N / Person}$) mit den für Gehen charakteristischen Schrittfolgen 1.7 Hz, 2.0 Hz und 2.3 Hz durchgeführt (Gehen entlang der Mittelachse in Längsrichtung, d. h. in Spannrichtung). Die Schrittweite betrug bei allen Schrittfolgen 1 m. Die Schwingungen wurden zentral auf der jeweils angeregten Decke in Plattenmitte gemessen.

Die Systemantworten werden mit dem vereinfachten Verfahren nach Gleichung D und mit dem genaueren Verfahren¹ berechnet und den gemessenen Systemantworten in den Tabellen 13 und 14 gegenübergestellt. Die Berechnung erfolgt jeweils mit dem Mittelwert (med.) und dem 95%-Fraktilwert (max.) der Anregung aus Tabelle 2, die mit den Mittelwerten aus mindestens drei Einzelmessungen und dem maximal gemessenen Wert verglichen werden. In Bild 11 ist exemplarisch eine gemessene Systemantwort der oberen Decke auf zwei längs gehende Personen und in Bild 12 die Systemantwort der unteren Decke auf eine längs gehende Person gezeigt. Man erkennt die charakteristische Umhüllende, die in Abbildung 6a idealisiert dargestellt ist.

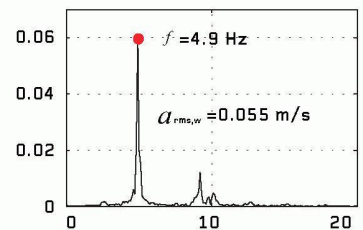
Die Ergebnisse des vereinfachten Verfahrens liegen aufgrund der Annahme einer konstanten harmonischen Anregung um den Faktor 2 bis 3 über den gemessenen Systemantworten. Die Mittelwerte des genaueren Verfahrens stimmen für die Anregung mit der zweiten Harmonischen mit $\pm 40 \%$ mit den gemessenen Ergebnissen deutlich besser überein. Bei der Berechnung der Systemantwort aufgrund einer Anregung mit der vierten Harmonischen wird die Systemantwort mithilfe des genaueren Verfahrens überschätzt, da, wie vorstehend erwähnt, nur kurze Resonanzzustände zwischen System und Anregung auftreten.



11



12



11 Exemplarische Systemantwort der oberen Decke ($f = 4.12 \text{ Hz}$) auf zwei längs gehende Personen mit einer Schrittfolgen von ca. $f_0 = 2 \text{ Hz}$

12 Exemplarische Systemantwort der unteren Decke ($f = 4.87 \text{ Hz}$) auf eine längs gehende Person mit einer Schrittfolgen von ca. $f_0 = 2.3 \div 2.4 \text{ Hz}$

Eingangsparameter							gemessen		Vereinfachtes Verf. Gl. (D)		Genaueres Verfahren ¹	
Mess- punkt	Harmo- nische	f_{angeregt}	$\phi_{A,B}$	$\alpha_n G_0$	M_l	ζ	$a_{\text{rms},w}$ max.	$a_{\text{rms},w}$ med.	$a_{\text{rms},w}$ max.	$a_{\text{rms},w}$ med.	$a_{\text{rms},w}$ max.	$a_{\text{rms},w}$ med.
	α_n [–]	[–]	[–]	[N]	[kg]	[%]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]
2 Pers.	α_2	4.87	0.85	192	23.900	0.25	0.200	0.110	0.322	0.188	0.135	0.079
1 Pers.	α_2	4.87	0.85	96	23.900	0.25	0.055	0.040	0.161	0.094	0.068	0.039
1 Pers.	α_3	5.2(1)	0.83	72	23.200	0.30	0.066	0.045	0.189	0.116	0.089	0.054

13 Systemantwort der unteren Decke

Eingangsparameter							gemessen		Vereinfachtes Verf. Gl. (D)		Genaueres Verfahren ¹	
Mess- punkt	Harmo- nische	f_{angeregt}	$\phi_{A,B}$	$\alpha_n G_0$	M_l	ζ	$a_{\text{rms},w}$ max.	$a_{\text{rms},w}$ med.	$a_{\text{rms},w}$ max.	$a_{\text{rms},w}$ med.	$a_{\text{rms},w}$ max.	$a_{\text{rms},w}$ med.
	α_n [–]	[–]	[–]	[N]	[kg]	[%]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]
2 Pers.	α_2	4.12	0.87	192	24.100	0.25	0.141	0.104	0.365	0.213	0.155	0.09
1 Pers.	α_2	4.40	0.87	96	23.800	0.30	0.062	0.048	0.173	0.101	0.074	0.043
1 Pers.	α_4	9.03	0.66	64	8.500	0.40	0.061	0.047	0.242	0.151	0.118	0.074

14 Systemantwort der oberen Decke

Aus den Ergebnissen der Tabellen 13 und 14 lässt sich folgern, dass das vereinfachte Verfahren nach Gleichung D zur Berechnung der auftretenden Schwingungsgrößen weitgespannter Decken infolge gehender Fussgänger zur Abschätzung der Schwingungsanfälligkeit eine geeignete Methode ist. Es beurteilt die Schwingungsanfälligkeit adäquater als eine Systemauslegung «rein» auf Basis einer Frequenzabstimmung. Aufgrund des vereinfachten Ansatzes der Anregung liegt die Berechnung gegenüber dem genaueren Verfahren jedoch auf der sicheren Seite. Wird eine wirtschaftliche Systemauslegung angestrebt, ist die Berechnung nach dem genaueren Verfahren lohnend.

Claus Maier, Dr.-Ing. M.Sc., S.A.N. Stöffler - Abraham - Neujahr, D - Darmstadt, maier@san-ing.de

Literatur

- 1 Maier, C.: Ein Beitrag zur Modellierung des Schwingungsverhaltens schlanker Deckentragwerke unter fussgängerinduzierter Anregung. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt, FG Statik und Dynamik, 2006.
- 2 Galbraith, F.W.; Barton, M.V.: Ground Loading from Footsteps. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 48(5), S. 1288–1292, 1970.
- 3 Bachmann, H.: Vibration Problems in Structures – Practical Guidelines. Birkhäuser, 1997.
- 4 Kerr, S.C.: Human Induced Loading on Staircases. PhD Thesis, University of London, 1998.
- 5 ISO 2631 Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of human exposure to wholebody vibration
ISO 2631-1: 1997 Part 1: General requirements
ISO 2631-2: 1989 Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1–80 Hz).
International Organisation for Standardization, 1989–2001.
- 6 Maier, C.; Heger, C.; Neujahr, M.; Stöffler, J.: Forschungsbericht: Grossversuch zum Einfluss nichttragender Ausbauelemente auf das Schwingungsverhalten weitgespannter Verbundträgerdecken. FG Statik und Dynamik, Technische Universität Darmstadt, 2005.
- 7 Neujahr M., Maier C.: Untersuchungen zum Einfluss leichter Trennwände auf das Schwingungsverhalten leichter weitgespannter Verbundträgerdecken. VDI-Berichte 1941, Baudynamik, 2006.