



Universität Stuttgart

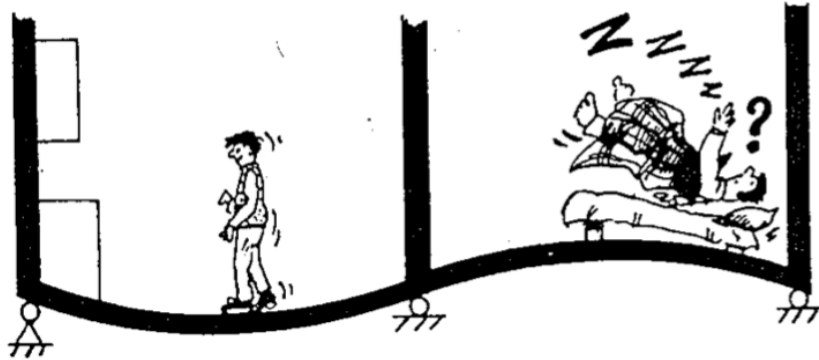
Institut für Konstruktion und Entwurf

Schwerpunkte: Stahlbau, Holzbau und Verbundbau

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann



**Harrer
Ingenieure**



Deckenschwingungen als Problem, aus Hamm (2017)

Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Holz-Beton-Verbund- Konstruktionen (HBV)

Vortrag zur Masterarbeit

Universität Stuttgart

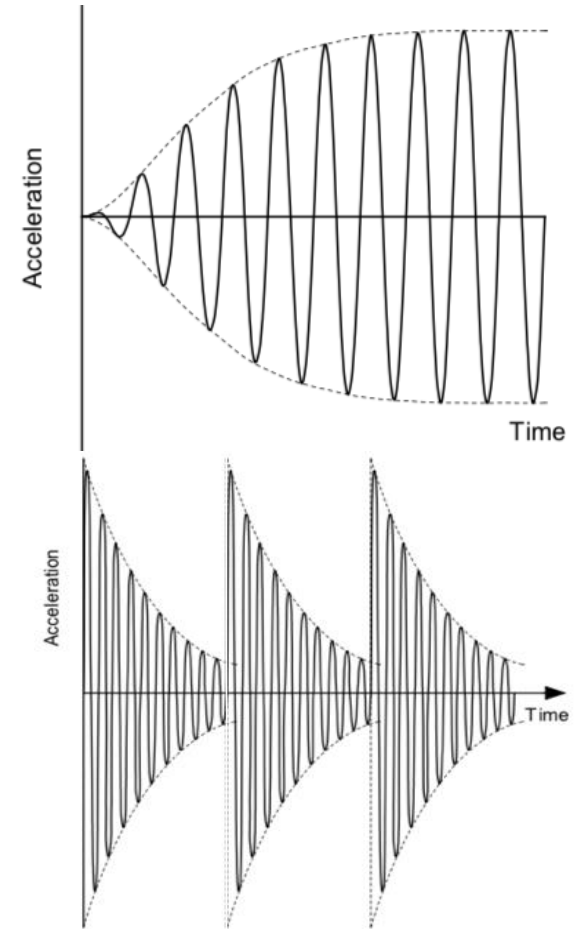
07.12.2020

Steffen zu
Jeddeloh

Inhaltsübersicht

Schwingungsverhalten von HBV - Konstruktionen

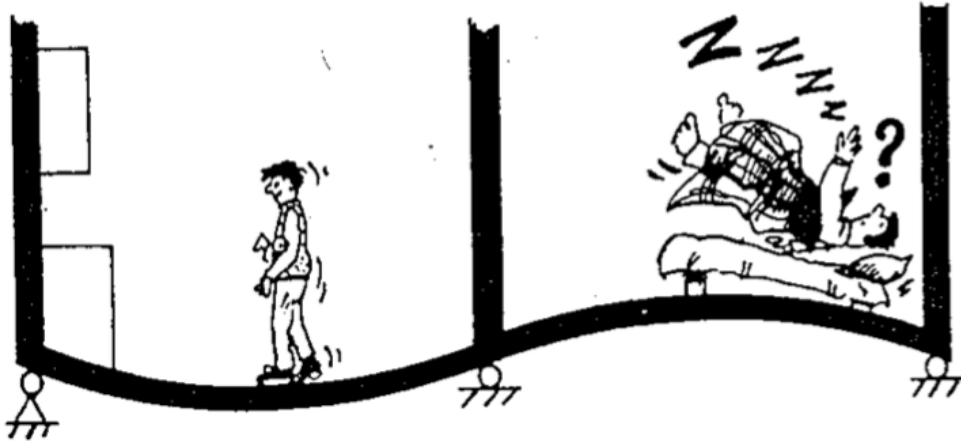
1. Grundlagen zum Schwingungsverhalten
2. Nachweise nach den aktuellen Eurocodes EC5-1-1 (2010) und EC5-2 (2010)
3. Nachweis gemäß dem Stand der Technik
4. Nachweise nach den zukünftigen Eurocodes EC5-1-1 (202X) und EC5-2 (202X)
5. Vergleich der vorgestellten Nachweiskonzepte
6. Zusammenfassung und Ausblick



Menscheninduzierte Schwingungen,
aus Smith et al. (2009)

1. Grundlagen zum Schwingungsverhalten

1.1 Darstellung der Schwingungsproblematik



Deckenschwingungen als Problem, aus Hamm (2017)

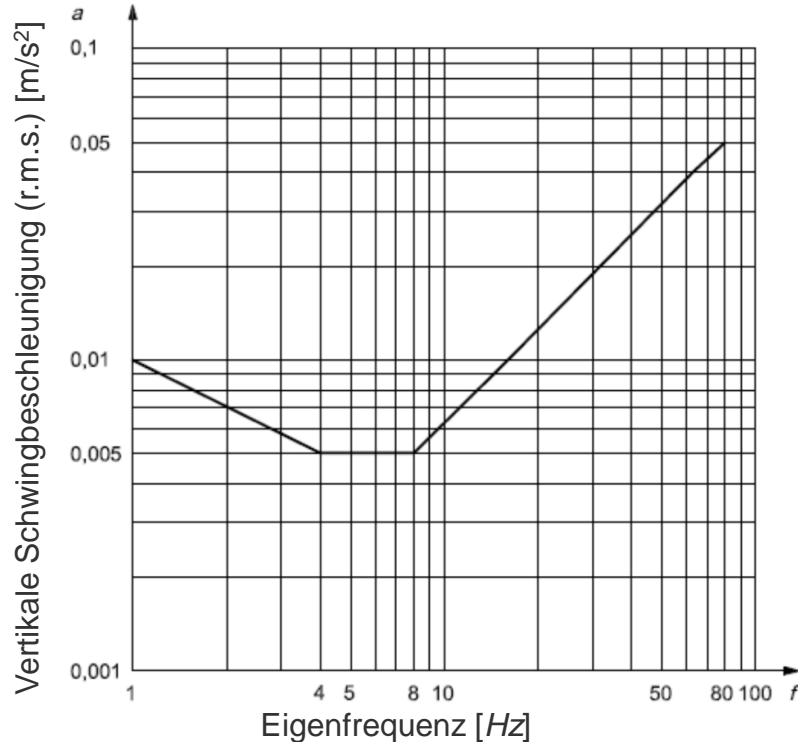
Wichtige Parameter:

- Mitschwingende Masse M^*
- Belastung durch Fußgänger
- Spannweite l
- Biegesteifigkeit $EI_{l,ef}$
- Dämpfung ζ
- Menschliche Wahrnehmung

→ unangenehme und störende Schwingungen müssen vermieden werden!

1. Grundlagen zum Schwingungsverhalten

1.2 Menschliche Wahrnehmung

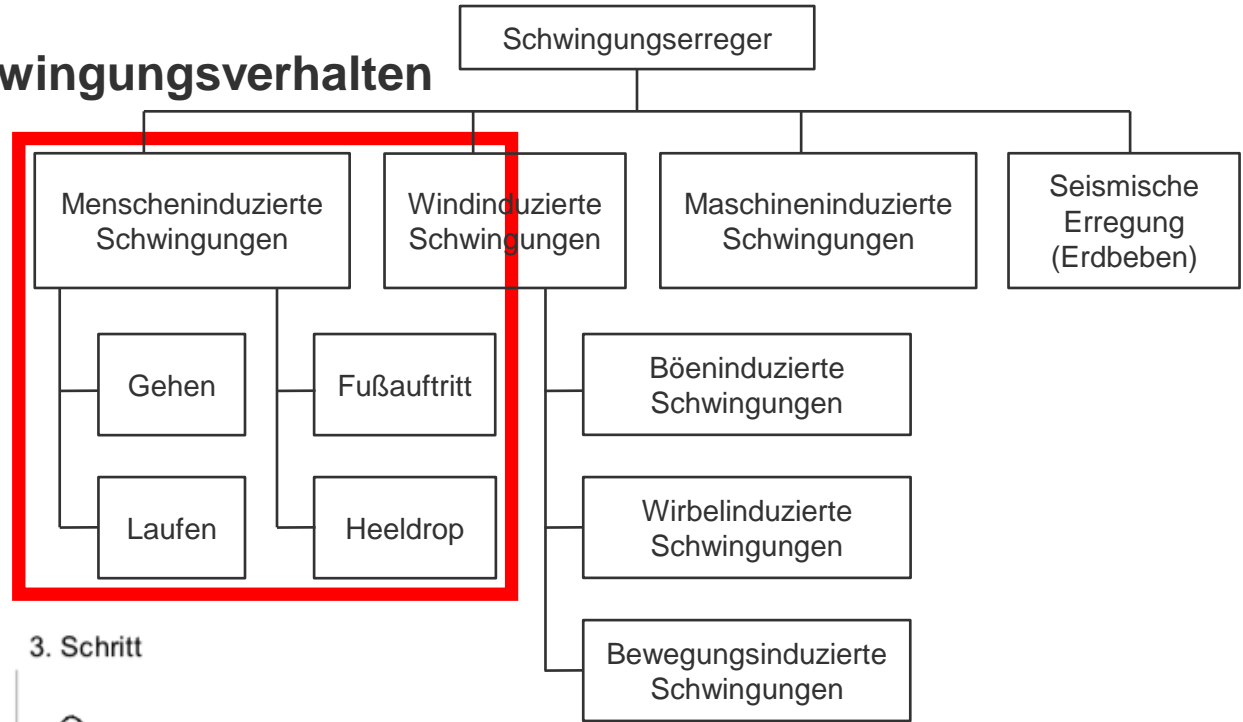


Basiskurve ISO 10137, aus Hamm et al. (2018)

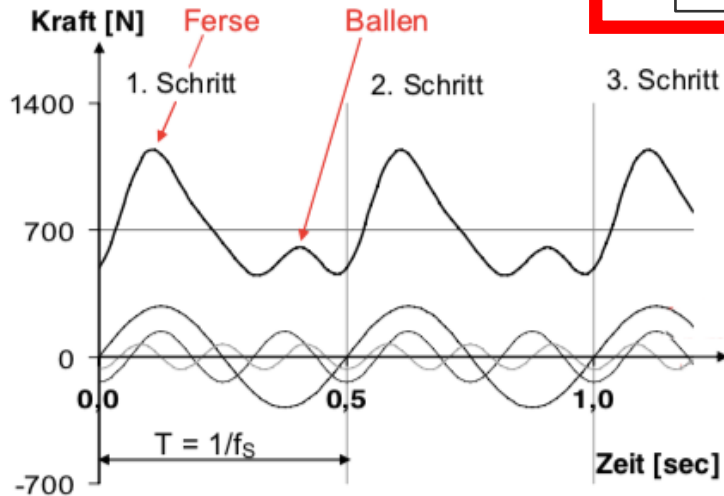
- Wahrnehmung ist von Mensch zu Mensch unterschiedlich
- Wahrnehmung von Schwingungen hängt von der Frequenz ab
- Effektivwert wird zur Beurteilung von Schwingungen herangezogen

1. Grundlagen zum Schwingungsverhalten

1.3 Schwingungserreger



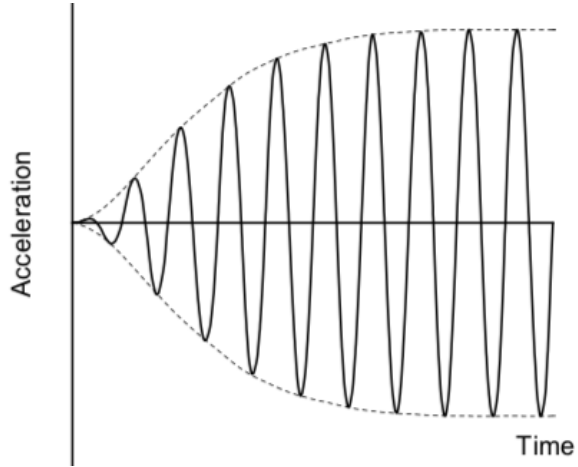
Kraft-Zeit-Verlauf beim Gehen, aus Hamm (2010)



→ Darstellung der Belastung als Fourier-Reihe
Schrittfrequenzen und deren Vielfache sind zu berücksichtigen!

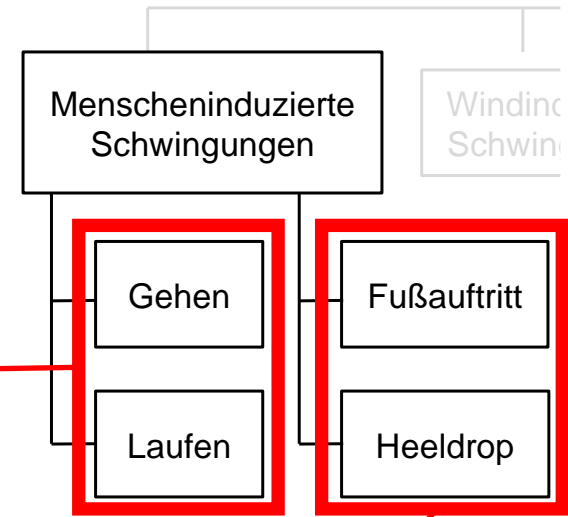
1. Grundlagen zum Schwingungsverhalten

1.3 Schwingungserreger

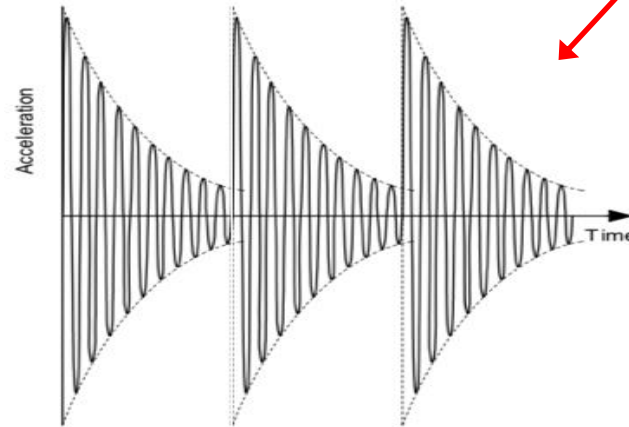
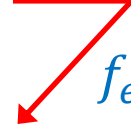


Periodische Belastung, aus Smith et al. (2009)

$$f_{e,1} < 8 \text{ Hz}$$



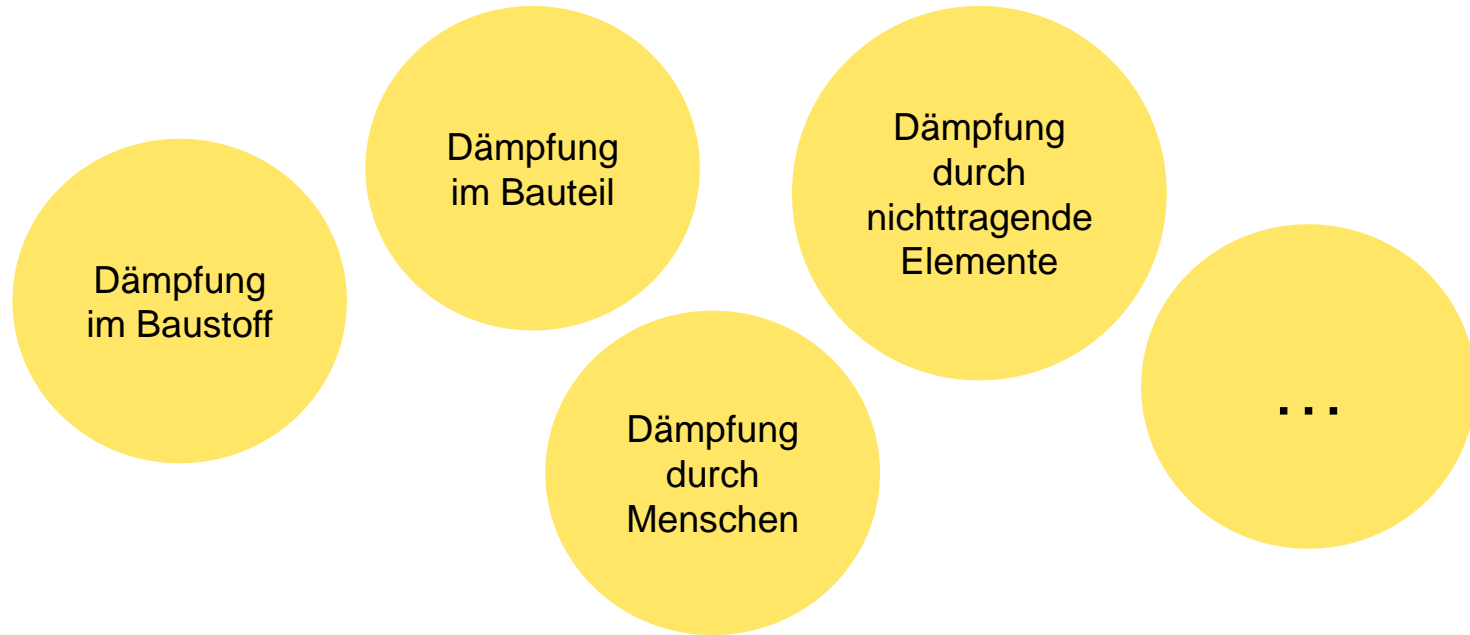
$$f_{e,1} \geq 8 \text{ Hz}$$



Transiente Belastung, aus Smith et al. (2009)

1. Grundlagen zum Schwingungsverhalten

1.4 Dämpfung



→ Dämpfung besteht aus vielen Mechanismen und ist daher schwierig zu bestimmen
Genaue Ermittlung erst am fertiggestellten Bauwerk → Planung?

**2. Schwingungsnachweis
nach aktueller Norm
2.1 Eurocode 5-1-1 (2010)**

**3. Schwingungsnachweis
nach dem Stand der
Technik: Hamm (2010)**

Frequenzkriterium

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

$\geq 8 \text{ Hz}$

$\geq 4,5 \text{ Hz}$

Steifigkeitskriterium

$$\frac{w}{F} \leq w_{\text{grenz}}$$

Ja

Ja

Geschwindigkeitskriterium

Ja

Nein

Beschleunigungskriterium

Nein

Ja

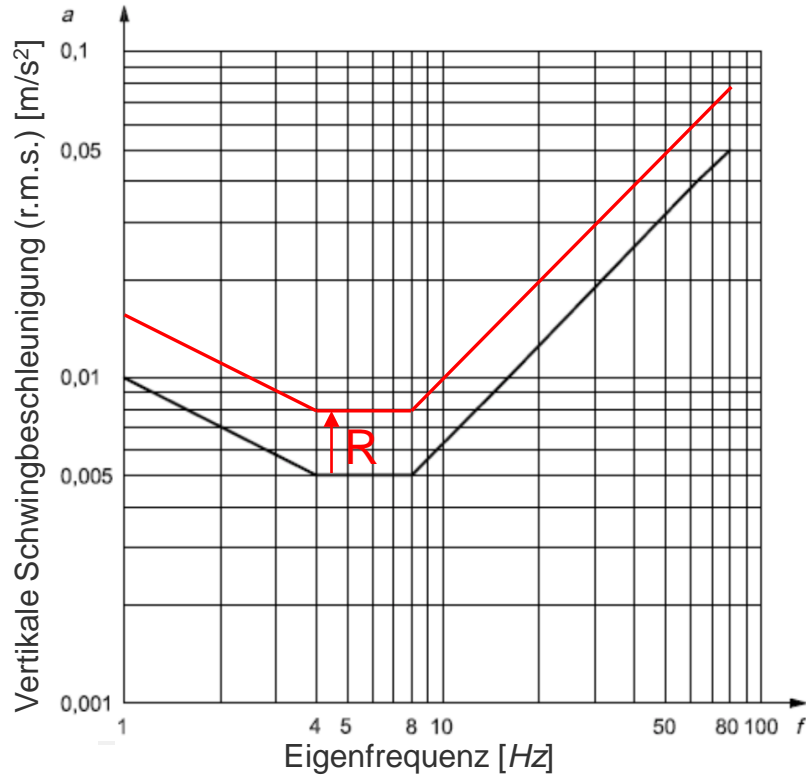
Konstruktive Maßnahmen

Nein

Ja

4. Schwingungsnachweis nach zukünftiger Norm

4.1 Eurocode 5-1-1 (202X)



Basiskurve ISO 10137, aus Hamm et al. (2018)

Kriterium	Komfortklasse					
	1	2	3	4	5	6
Steifigkeitskriterium $w_{1\text{ kN}} [mm] \leq$		0,25	0,5	0,8	1,2	1,6
Antwortfaktor R	4	8	12	20	30	40
Frequenzkriterium $f_1 [Hz] \geq$			4,5			
Beschleunigungskriterium $a_{rms,lim} [m/s^2] \leq$				0,005 R		
Geschwindigkeitskriterium $v_{rms,lim} [m/s] \leq$					0,0001 R	

- Beschleunigung und Geschwindigkeit sind Effektivwerte
- Nachweise werden mit der menschlichen Wahrnehmung verknüpft

2. Schwingungsnachweis nach aktueller Norm

2.2 Eurocode 5-2 (2010)

Frequenzkriterium

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} \begin{cases} \leq 5,0 \text{ Hz} \\ \leq 2,5 \text{ Hz} \end{cases}$$

Beschleunigungskriterium

$$a_{vert,n} = a_1 \cdot 0,23 \cdot n \cdot k_{vert} \leq a_{lim}$$

Beschleunigung durch einzelne Person

Synchronisationsfaktor

Abminderungsfaktor

Fußgänger 1. Harmonische ($f \leq 2,5 \text{ Hz}$)	$\frac{100}{M^* \cdot \zeta}$
Fußgänger 2. Harmonische ($2,5 \text{ Hz} < f \leq 5,0 \text{ Hz}$)	$\frac{50}{M^* \cdot \zeta}$
Jogger ($2,5 \text{ Hz} \leq f \leq 3,5 \text{ Hz}$)	$\frac{300}{M^* \cdot \zeta}$

Fußgängeranzahl

Fußgängerstrom	$n = 0,6 \cdot A$
Fußgänger- oder Joggergruppe	$n = 13$

→ Nachweis der Schwingbeschleunigung nur erforderlich, wenn Eigenfrequenzen im kritischen Frequenzbereich

4. Schwingungsnachweis nach zukünftiger Norm

4.2 Eurocode 5-2 (202X) und Eurocode 1-2 (202X)

Komfortklassen, nach EC0 (202X)

Komfortklassen	Grad des Komforts	Maximale Beschleunigungen a_{lim} [m/s^2]	
		vertikal	horizontal
CL 3	maximal	$\leq 0,5$	$\leq 0,15$
CL 2	mittel	$\leq 1,0$	$\leq 0,3$
CL 1	minimal	$\leq 2,5$	$\leq 0,80$
CL 0	Keine Begrenzung	$> 2,5$	$> 0,80$

Verkehrsklassen, nach EC1-2 (202X)

Verkehrsklassen	Beschreibung	Fußgängerstrom mit Dichte d (A)	Fußgängergruppe n_w (B)	Läufergruppe n_i (C)
TC 1	sehr geringer Verkehr	$n = 0,1 P/m^2$	1	0
TC 2	geringer Verkehr	$n = 0,2 P/m^2$	2	0
TC 3	dichter Verkehr	$n = 0,5 P/m^2$	4	1
TC 4	sehr dichter Verkehr	$n = 1,0 P/m^2$	8	2
TC 5	außergewöhnlich dichter Verkehr	$n = 1,5 P/m^2$	16	4

→ Komfort- und Verkehrsklassen sind beliebig kombinierbar

→ Nachweise sind an individuelle Gegebenheiten anpassbar

4. Schwingungsnachweis nach zukünftiger Norm

4.2 Eurocode 5-2 (202X) und Eurocode 1-2 (202X)

EC5-2 (202X): vereinfachtes Verfahren

$$a_{vert,n} = a_{vert,1} \cdot n' \cdot \psi_{vert}$$

$$a_{vert,1} = \frac{100}{M^* \cdot \zeta}$$

analytisches Bemessungskonzept

EC1-2 (202X): genaues Verfahren

3 Lastmodelle:

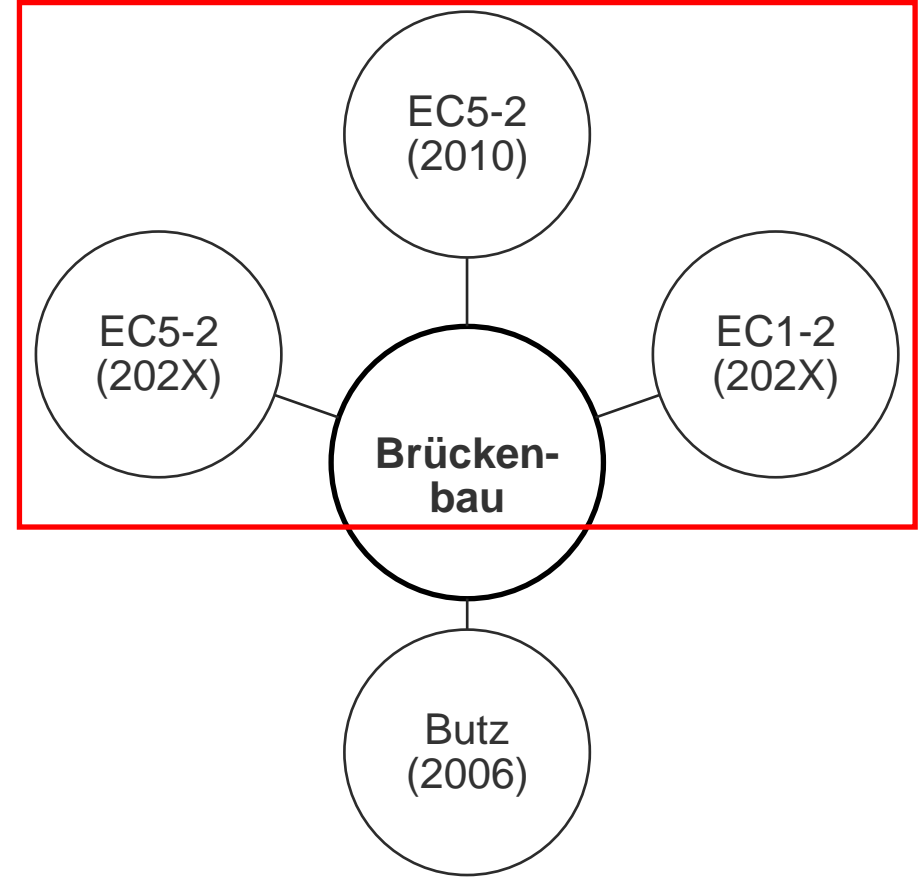
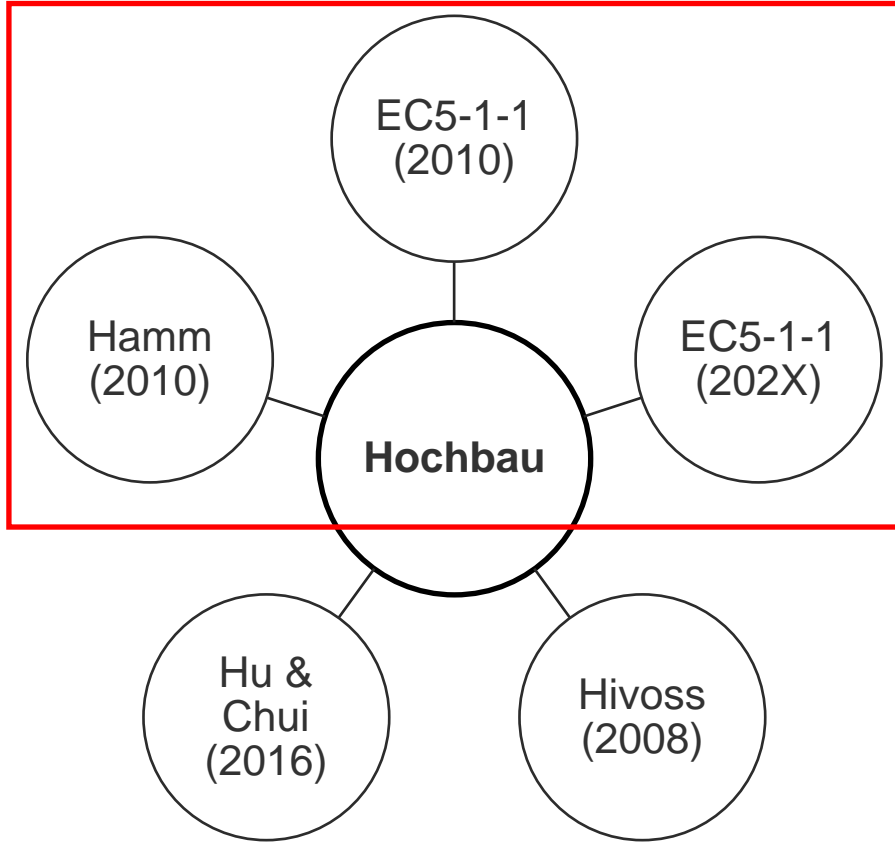
- Fußgängerstrom
 - Fußgänger(-gruppe)
 - Jogger(-gruppe)
- } $p(x)$

numerisches Bemessungskonzept,
ersatzweise auch analytisch lösbar
nach JRC-Report:

$$a_n = \frac{p^*}{M^*} \cdot \frac{1}{2 \cdot \zeta}$$

→ EC1-2 (202X) geht von einer numerischen Berechnung aus (z.B. FEM),
analytischer Nachweis nur als Ergänzung

5. Vergleich der Bemessungskonzepte



5. Vergleich der Bemessungskonzepte

5.1 Hochbau

Frequenz

Einflussfaktoren Eigenfrequenz

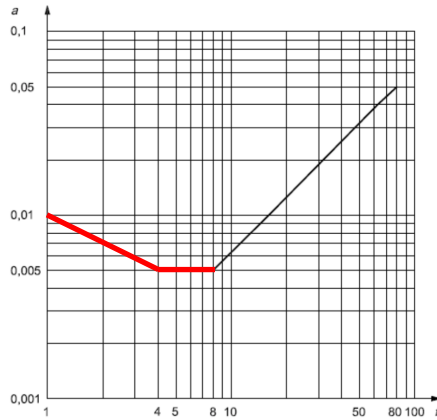
	EC5-1-1 (2010)	Hamm (2010), EC5-1-1 (202X)
Mindestfrequenz f_{min}	8 Hz	4,5 Hz
Systeme	nur Einfeldträger	Mehrfeld- und Plattensysteme
Biegesteifigkeit des Estrichs	nein	ja
Nutzung	nur Wohnnutzung	verschiedene Kategorien
Lagerbedingungen	starr	starr und nachgiebig

→ Ziel: möglichst genaue Ermittlung der Eigenfrequenzen
Resonanz im Bereich der 1. und 2. Harmonischen ist zu vermeiden

5. Vergleich der Bemessungskonzepte

5.1 Hochbau

Schwingbeschleunigung



Basiskurve ISO 10137, aus Hamm et al. (2018)

Berechnung der Schwingbeschleunigung:

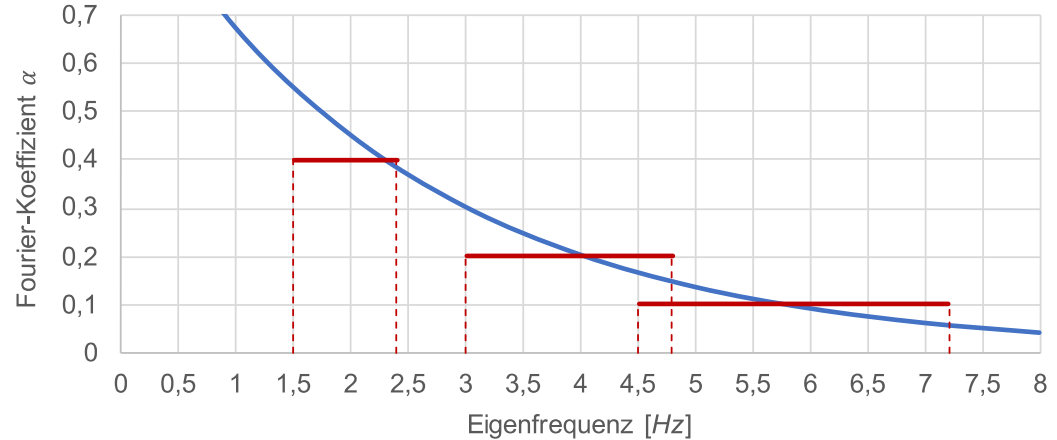
Hamm (2010)

EC5-1-1 (202X)

$$a = \frac{1}{5} \cdot \alpha_i \cdot \frac{F_0}{M^* \cdot \zeta}$$

$$a_{rms} = \frac{1}{7} \cdot \alpha \cdot \frac{F_0}{M^* \cdot \zeta}$$

$$\cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \approx \frac{1}{7}$$



- EC5-1-1 (202X)
- 1. Harmonische
- 2. Harmonische
- 3. Harmonische

Vergleich Fourier-Koeffizienten

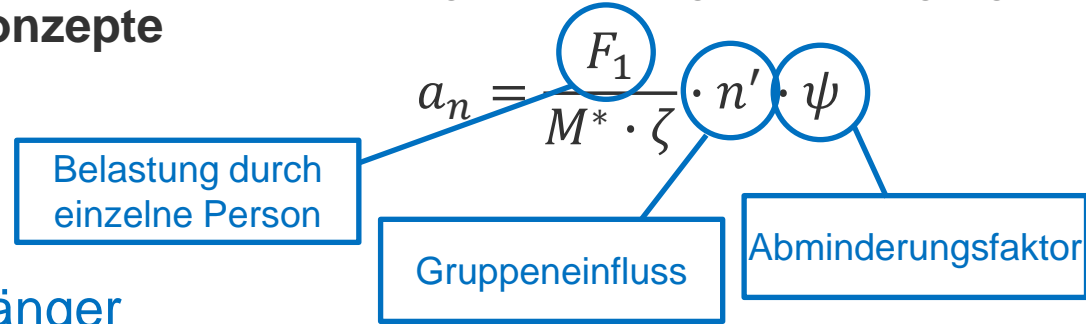
5. Vergleich der Bemessungskonzepte

5.2 Brückenbau

Schwingbeschleunigung

Belastung durch einzelnen Fußgänger

Berechnung der Schwingbeschleunigung:



Belastung durch einen einzelnen Fußgänger [N]

Richtung	EC5-2 (2010)	EC5-2 (202X)	EC1-2 (202X)
vertikal	100	100	89,12
horizontal	25	25	11,14

→ Nachweis nach EC1-2 (202X) ist günstiger

5. Vergleich der Bemessungskonzepte

5.2 Brückenbau

Schwingbeschleunigung

Effektive Personenanzahl

Fußgänger- und Joggergruppen

EC5-2 (2010)	EC5-2 (202X)	EC1-2 (202X)
$n' = 0,23 \cdot n$	$n' = 0,23 \cdot n$	$n' = \sqrt{n}$

Verkehrs- klasse	Effektive Anzahl Fußgänger n' in Fußgängergruppe			Effektive Anzahl Jogger n' in <u>Joggergruppe</u>		
	EC5-2 (2010)	EC5-2 (202X)	EC1-2 (202X)	EC5-2 (2010)	EC5-2 (202X)	EC1-2 (202X)
TC 1	} 2,99	1	1	} 2,99	0	0
TC 2		0,46	1,41		0	0
TC 3		0,92	2		1	1
TC 4		1,84	2,83		0,46	1,41
TC 5		3,68	4		0,92	2

→ Effektive Gruppengrößen nach EC5-2 (202X) bisher zu klein!

6. Zusammenfassung und Ausblick

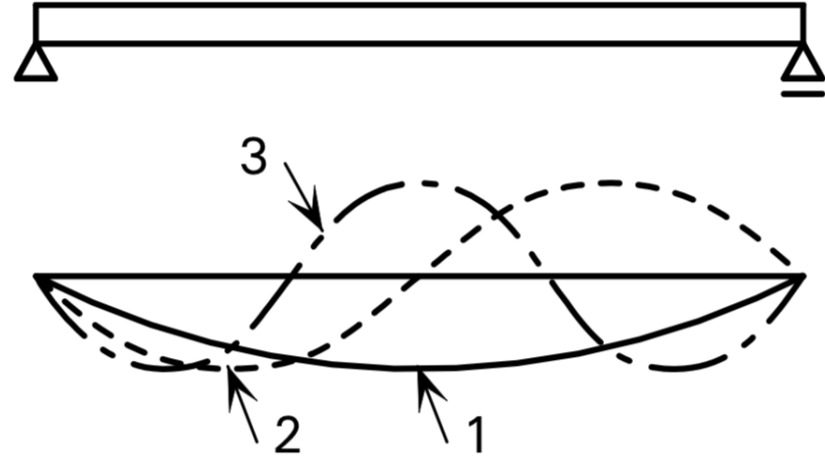
→ Beitrag zu zukünftigen Eurocodes EC5-1-1 (202X) und EC5-2 (202X)

→ Zukünftig:

- bessere Identifizierung,
- zutreffendere Bewertung,

→ Höherer Komfort

Vielen Dank!



Steffen zu Jeddelloh

Universität Stuttgart
Institut für Konstruktion und Entwurf
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart



Harrer Ingenieure GmbH
Reinhold-Frank-Str. 48b
76133 Karlsruhe

Felix-Wankel-Str. 6
73760 Ostfildern-Nellingen

