

## 7 Schwingungsprobleme bei Bauwerken

### 7.1 Einführung

Es gibt immer mehr **Schwingungsprobleme** weil:

- Hochwertigere Baustoffe, stärkere Ausnutzung
  - schlankere Konstruktionen
  - kleinere Steifigkeiten und Massen
- Intensivere dynamische Einwirkungen
- Grössere Empfindlichkeit der Menschen

Trotzdem werden schwingungsempfindliche Bauwerke oft nur für statische Lasten bemessen

#### Ziel

- Übersicht geben über Ursachen von Schwingungsproblemen bei Bauwerken und mögliche Massnahmen
- Beschreibung von praktischen Fällen mit Schwingungsanierungen

### 7.1.1 Einwirkungen

#### a) *Menschenerregte Schwingungen*

- Fussgängerbrücken
- Decken in Gebäuden
- Turn- und Sporthallen
- Tanzlokale und Konzertsäle
- Sprungtürme in Schwimmbädern

#### b) *Maschinenerregte Schwingungen*

- Decken und Fundamente
- Glockentürme
- Konstruktionen mit Körperschall
- Bauwerke mit Schwingungen aus dem Baugrund

#### c) *Winderregte Schwingungen*

- Gebäude
- Türme, Kamine und Masten
- Brücken
- Kragdächer

#### d) *Durch Verkehr und Bauarbeiten erregte Schwingungen*

- Brücken
- Bauwerke in der Nähe von Strassen und Bahnen
- Bauwerke in der Nähe von Baustellen

### 7.1.2 Neue Tragwerksnormen

Durchsuchung der neun Normen SIA 260 bis 263 nach Wörtern “dyna”, “schwing”, “freq” ohne Berücksichtigung der Einwirkungen “Erdbeben” und “Strassenlasten” (Dynamischer Beiwert  $\Phi$ )

#### SIA 260: “Grundlagen der Projektierung von Tragwerken”

##### • Einwirkungen

3.2.5	<b>Dynamische Einwirkungen</b>
3.2.5.1	Die in der Norm SIA 261 enthaltenen Einwirkungsmodelle berücksichtigen Beschleunigungseffekte entweder in den charakteristischen Werten oder über dynamische Beiwerte.
3.2.5.2	Wenn dynamische Einwirkungen erhebliche Beschleunigungen des Tragwerks verursachen, sind dynamische Berechnungen durchzuführen.

##### • Tragwerksmodell

3.3.5	<b>Berechnungsmodelle für dynamische Einwirkungen</b>
3.3.5.1	Im Berechnungsmodell sind Masse, Steifigkeit, Tragwiderstand und Dämpfung aller Bauteile möglichst realistisch zu berücksichtigen.
3.3.5.2	Wenn dynamische Einwirkungen als quasi-statisch betrachtet werden können, werden sie im Falle von aussergewöhnlichen Einwirkungen durch statische Ersatzkräfte unter Berücksichtigung der Duktilität des Tragwerks ersetzt. Bei veränderlichen Einwirkungen werden die dynamischen Anteile entweder den statischen Werten zugeschlagen oder über dynamische Vergrößerungsfaktoren berücksichtigt. Für bestimmte dynamische Vergrößerungsfaktoren sind Eigenfrequenzen zu ermitteln.
3.3.5.3	Bei beträchtlicher Interaktion von Tragwerk und Baugrund kann der Beitrag des Baugrunds mittels geeigneter Feder-, Massen- und Dämpfungselemente berücksichtigt werden. Die Anwendung ist in Norm SIA 267 geregelt.
3.3.5.4	In bestimmten Fällen können die Einwirkungen auf Grund einer Schwingungsberechnung unter der Annahme eines bezüglich Geometrie und Werkstoff linearen Verhaltens ermittelt werden. Sofern nur die Grundschiwingung massgebend ist, kann die Schwingungsberechnung durch eine Berechnung mit äquivalenten statischen Einwirkungen ersetzt werden, die unter anderem von der Schwingungsform, der Eigenfrequenz und der Dämpfung abhängen.
3.3.5.5	In anderen Fällen können die dynamischen Einwirkungen mit Hilfe von Zeitverläufen oder im Frequenzbereich angegeben werden, und das Tragwerksverhalten kann mit geeigneten Methoden bestimmt werden.
3.3.5.6	Richtwerte zur Beurteilung von Schwingungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sind im Anhang angegeben.

##### • Grenzzustände

4.3.2	<b>Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit</b>
4.3.2.1	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit betreffen: <ul style="list-style-type: none"> <li>– die Funktionstüchtigkeit des Bauwerks</li> <li>– den Komfort der Personen, die das Bauwerk nutzen</li> <li>– das Aussehen des Bauwerks.</li> </ul>
4.3.2.2	Die Bemessungskriterien der Gebrauchstauglichkeit können sich beziehen auf: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Verformungen, welche die Funktionstüchtigkeit oder das Aussehen des Bauwerks oder dessen Einrichtungen beeinträchtigen oder Schäden an nichttragenden Bauteilen hervorrufen</li> <li>– Schwingungen, welche die Funktionstüchtigkeit des Bauwerks einschränken oder den Komfort der das Bauwerk nutzenden Personen beeinträchtigen</li> <li>– Dichtigkeitsmängel, welche die Funktionstüchtigkeit des Bauwerks einschränken oder die Nutzung des Bauwerks beeinträchtigen</li> <li>– bauweisenspezifische Auswirkungen (z.B. Risse, Schlupf in Verbindungen), die das Aussehen des Bauwerks und die Dauerhaftigkeit des Tragwerks beeinträchtigen</li> <li>– Grenzwerte der Umweltbelastung (z.B. Grundwasseraufstau).</li> </ul>

##### • Anhang A: Gebäude

Tabelle 5: Richtwerte für Eigenfrequenzen bei Gebäuden	
Grenzzustand	Eigenfrequenz [Hz]
Komfort	
– Turn- und Sporthallen	> 8,0
– Tanzlokale und Konzertsäle	> 7,0
Eigenfrequenzen abweichend von den angegebenen Richtwerten sind zugelassen, wenn eine genauere dynamische Berechnung unter Berücksichtigung der Dämpfung durchgeführt wird.	

##### • Anhang C: Fuss- und Radwegbrücken

Tabelle 10: Richtwerte für Eigenfrequenzen von Fuss- und Radwegbrücken	
Grenzzustand	Eigenfrequenz [Hz]
Komfort	
– vertikale Schwingungen	> 4,5 bzw. < 1,6
– horizontale Schwingungen (quer)	> 1,3
– horizontale Schwingungen (längs)	> 2,5
Eigenfrequenzen abweichend von den angegebenen Richtwerten sind zugelassen, wenn eine genauere dynamische Berechnung unter Berücksichtigung der Dämpfung durchgeführt wird.	

**SIA 261: "Einwirkungen auf Tragwerke"**

• Wind

6.1.7	Windkanalversuche sind zu empfehlen, wenn die Baukosten und die ungewöhnliche Art des Bauwerks oder seiner Umgebung die damit verbundenen Aufwendungen rechtfertigen oder wenn aussergewöhnliche dynamische Einwirkungen auf das Bauwerk oder auf Nachbarbauwerke zu erwarten sind.
6.1.8	Das dynamische Verhalten von Hochhäusern, Kabeln, Masten, Kaminen, schlanken Brücken und ähnlichen Tragwerken ist zu prüfen. Entsprechende Auswirkungen sind gemäss den in Norm SIA 261/1 enthaltenen Angaben und Verweisungen zu ermitteln und zu beurteilen.
6.1.9	Die Ermüdung von Tragwerken oder Bauteilen, die durch Wind zum Schwingen angeregt werden, ist zu prüfen.

• Gebäudenutzung

<b>8.1</b>	<b>Allgemeines</b>
8.1.1	Nutzlasten in Gebäuden umfassen Lasten infolge der normalen Nutzung durch Personen, Lasten des Mobiliars, von Waren und des Füllguts von Behältern und Leitungen sowie Einwirkungen von Maschinen und leichten bis mittelschweren Fahrzeugen. Sie sind als freie veränderliche Einwirkungen zu behandeln.
8.1.2	Die Nutzflächen in Gebäuden sind gemäss Tabelle 8 zu kategorisieren.
8.1.3	Die Nutzlasten sind gemäss den Ziffern 8.2 und 8.3 festzulegen.
8.1.4	Der Einfluss der dynamischen Wirkung von Maschinen und Fahrzeugen auf die Beanspruchung und die Ermüdung des Tragwerks ist zu prüfen.

• Nichtmotorisierter Verkehr

<b>9.4</b>	<b>Dynamische Anregung</b>
	Die Schwingungsanfälligkeit von Bauwerken für nichtmotorisierten Verkehr ist zu prüfen. Die Schrittfrequenz beim Gehen beträgt ungefähr 2 Hz, beim Laufen 2,4 bis 3,5 Hz. Die in Norm SIA 260 angegebenen Richtwerte für Eigenfrequenzen von Fuss- und Radwegbrücken sind zu beachten.

• Anprall

14.1.7	Dynamische Analysen können erforderlich sein, wenn ein Tragwerksversagen infolge Anpralls schwere Folgeschäden nach sich zieht.
--------	---

**SIA 261/1: "Einwirkungen auf Tragwerke: ergänzende Festlegungen"**

• Verweisungen

Tabelle 1: Verweisungen der Norm SIA 261

Ziffer der Norm SIA 261	Stichwort/Thema	Weiterführende Angaben	Bemerkungen
5.3.5	Lastanordnung bei Gebäuden mit abgestuften Dächern	SN EN 1991-1-3	
5.3.6	Lastanordnung: Einfluss der Dachaufbauten auf die Windverfrachtung von Schnee	SN EN 1991-1-3	
6.1.6	Interferenzeffekte bei Reihen oder Gruppen von Bauwerken	SIA D0188	
6.1.8	Dynamisches Verhalten von Hochhäusern, Kabeln, Masten, Kaminen, schlanken Brücken und ähnlichen Bauwerken	SIA D0188	
6.2.3.2 6.2.3.3 6.3.5	Dynamischer Faktor zur Ermittlung der Windkräfte	SIA D0188	
15.3.1	Wärmefreisetzung bei Brand, Temperaturzeitkurven	SN EN 1991-1-2	

- SIA Dokumentation D0188: "Wind – Kommentar zum Kapitel 6 der Normen SIA 261 und 261/1 (2003) Einwirkungen auf Tragwerke" im Jahr 2006 erschienen.

• Wind

<b>8.1</b>	<b>Dynamisches Verhalten von Tragwerken</b>
8.1.1	Das dynamische Verhalten von Hochhäusern, Kabeln, Masten, Kaminen, schlanken Brücken und ähnlichen Tragwerken ist im Allgemeinen gemäss SIA D0188 zu untersuchen. Die dynamischen Eigenschaften des Bauwerks werden dabei durch die Eigenfrequenz, die Schwingungsform, die äquivalente Masse und den mechanischen Dämpfungsbeiwert beschrieben.
8.1.2	Die dynamischen Eigenschaften des Bauwerks sind mit rechnerischen Modellen oder anhand von Versuchen zu erfassen. Es sind dabei anerkannte Verfahren der Baudynamik zu verwenden.
8.1.3	Für Bauwerke mit üblichen und einfachen Formen können die dynamischen Eigenschaften des Bauwerks mit Näherungsformeln, die auf vereinfachten Modellen oder Erfahrungswerten basieren, ermittelt werden. Die verwendeten Formeln müssen ausreichend verifiziert werden.

Tabelle 9: Mechanischer Dämpfungsbeiwert ausgewählter Bauwerkstypen. Für Kamine bezeichnet  $h$  die Bauwerkshöhe und  $b$  den mittleren äusseren Durchmesser

Bauwerkstyp	$\xi$	
Gebäude in Stahlbeton	0,015	
Gebäude in Stahl	0,008	
Gebäude in Stahl-Beton-Verbundbau	0,013	
Stahlbetontürme und -kamine	0,005	
Stahlkamin, ohne Innenrohr und äussere Isolation	0,002	
Stahlkamin, ohne Innenrohr, mit äusserer Isolation	0,003	
Stahlkamin, mit thermischer Isolation	$h/b > 18$	0,003
	$20 < h/b < 24$	0,006
	$h/b < 26$	0,002
Stahlkamin, mit zwei oder mehr isolierten Innenrohren	$h/b > 18$	0,003
	$20 < h/b < 24$	0,006
	$h/b < 26$	0,004
Stahlkamin, ausgemauertes Rohr	0,01	
Stahlkamin, gunitiertes Rohr	0,005	
Stahlkamin, gekoppelte Rohre, Ohne Innenrohr und Isolation	0,002	
Stahlkamin, abgespanntes Rohr, ohne Isolation	0,006	
Stahlfachwerkbrücken und -türme	geschweisst	0,003
	mit HV-Schrauben	0,005
	ohne HV-Schrauben	0,008
Verbundbrücken	0,006	
Stahlbetonbrücken	vorgespannt, ungerissen	0,006
	gerissen	0,015
Holzbrücken	0,01...0,02	
Kabel	Paralleldrahtbündel	0,001
	Litzenbündel	0,003

### SIA 262: "Betonbau"

#### • Tragwerksanalyse und Bemessung

##### 2.3.3 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Gebrauchsgrenzen wie zulässige Verformungen, Rissbreiten oder Schwingungen sind in der Projektbasis festzulegen.

#### • Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

##### 4.4.1.1 Die nachfolgenden Nachweise beziehen sich auf:

- die Mindestbewehrung
- Verformungen
- Schwingungen
- die Dichtigkeit.

##### 4.4.4 Schwingungen

4.4.4.1 Bei zeitlich veränderlichen Einwirkungen sind das Schwingungsverhalten und dessen Auswirkungen auf die Funktionstüchtigkeit des Tragwerks sowie der Ausrüstung oder Einbauten und auf den Nutzungskomfort zu untersuchen.

4.4.4.2 Die Anforderungen bezüglich Schwingungsverhalten und die Einwirkungen sind in den Normen SIA 260 und 261 angegeben.

### SIA 263: "Stahlbau"

#### • Grundsätze

##### 2.1.4 Neben den in Norm SIA 260 aufgeführten Entwurfskriterien sind weitere Aspekte zu beachten, insbesondere:

- Standort und Bedeutung des Bauwerks
- Umweltverträglichkeit des Bauvorhabens
- Verformungen und Schwingungen, die den Tragwiderstand und das Verhalten während der Nutzung beeinträchtigen können
- Herstellungsbedingungen in der Werkstatt sowie Transportmöglichkeiten
- Gegebenheiten und Unfallrisiko bei der Montage
- Abstimmung der Lage der Montagestösse (unter Beachtung der Arbeitssicherheit) auf den Montagevorgang
- Gewährleistung einer einwandfreien Entwässerung, z.B. von Flachdächern
- Exposition des Tragwerks hinsichtlich Umwelteinflüssen
- Anforderungen an den Feuerwiderstand
- Anforderungen bezüglich Wärmedämmung und Schallschutz
- Zugänglichkeit unterhaltsbedürftiger Bauteile.

## • Ermüdung

4.7.1	<b>Allgemeines</b>
4.7.1.1	Mit einem ermüdungsgerechten Vorgehen für Entwurf, Tragwerksanalyse und Bemessung ist sicherzustellen, dass die Betriebslasten die Tragfähigkeit während der vorgesehenen Nutzungsdauer nicht beeinträchtigen.
4.7.1.2	Eine Überprüfung des Ermüdungsverhaltens ist in der Regel für Tragwerke erforderlich, die durch Bahn-, Strassen- oder Kranbahnlasten beansprucht werden oder Schwingungen unterworfen sind.
4.7.1.3	Ein Ermüdungsnachweis muss in der Regel nur erbracht werden, falls während der geplanten Nutzungsdauer folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind: <ul style="list-style-type: none"> <li>– mehr als 50 000 Spannungswechsel sind zu erwarten</li> <li>– die maximale Spannungsamplitude ist grösser als der Bemessungswert der Dauerfestigkeit <math>\Delta\sigma_D/\gamma_M</math> des entsprechenden konstruktiven Details.</li> </ul>

## • Gebrauchstauglichkeit

4.10.1.2	Das geforderte Verhalten des Tragwerks ist durch eine ausreichende Bemessung, eine sorgfältige konstruktive Durchbildung, eine plangemässe und sorgfältige Ausführung sowie durch einen angemessenen Unterhalt zu gewährleisten. Das Verhalten des Tragwerks muss innerhalb vorgegebener oder vereinbarter Grenzen liegen. Diese Grenzen beziehen sich bei Stahlbauten üblicherweise auf: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Verformungen</li> <li>– Schwingungen</li> <li>– Korrosionsbeständigkeit (vgl. SN EN ISO 12 944).</li> </ul>
----------	--

4.10.4	<b>Schwingungen</b>
4.10.4.1	Bei rasch wechselnder, periodischer Einwirkung ist das Schwingungsverhalten von Tragwerken zu erfassen. Die Auswirkung auf die Funktionstüchtigkeit des Tragwerks bezüglich der sekundären Bauteile und Einrichtungen sowie bezüglich des Komforts für Bauwerksbenutzer ist zu untersuchen.
4.10.4.2	Die Einwirkungen und die Anforderungen an das Schwingungsverhalten sind in den Normen SIA 260 und SIA 261 festgelegt.
4.10.4.3	Schwingungsgefährdete Konstruktionen sind so zu entwerfen, dass keine Resonanzeffekte entstehen, die Ermüdungsbrüche verursachen oder die Tragfähigkeit beeinflussen.

## Fazit:

Es gibt verhältnismässig wenig Hinweise

→ **Fachliteratur**

## 7.1.3 Literatur

[Bac+97] Bachmann et al.: "Vibration Problems in Structures". ISBN 3-7643-5148-9. Birkhäuser Verlag, Basel 1997.

[BB88] Baumann K., Bachmann H.: "Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke". IBK Bericht Nr. 7501-3, 1988.

[BW95] Bachmann H., Weber B.: "Tuned Vibration Absorbers for 'Lively' Structures". IBK-Sonderdruck 0006. Zürich 1995.

[SIA06] SIA: "Wind – Kommentar zum Kapitel 6 der Normen SIA 261 und 261/1 (2003) Einwirkungen auf Tragwerke". SIA Dokumentation D0188. Zürich 2006.

[SIA03] SIA: "Aktuelle Probleme der Brückendynamik". SIA Dokumentation D0198. Zürich 2003.

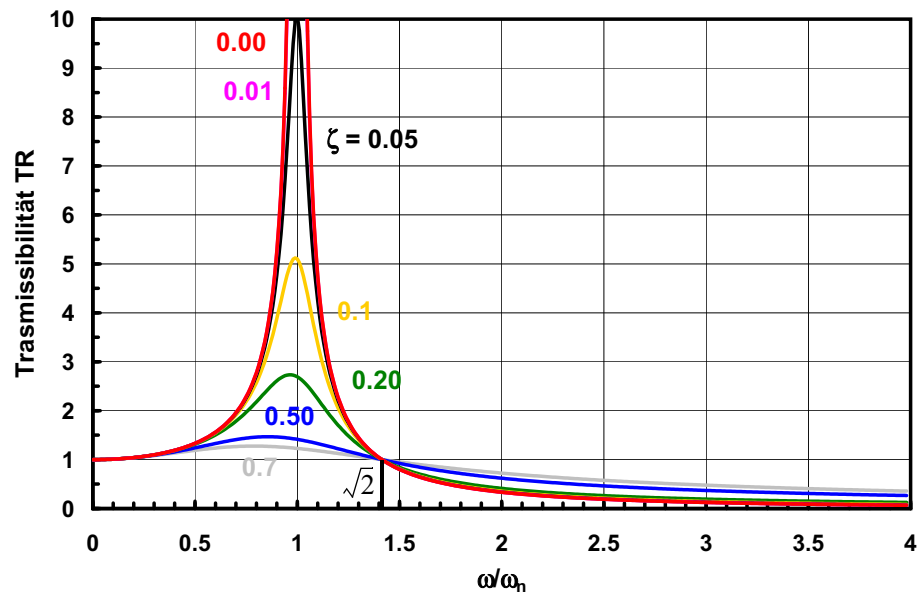
[SIA96] SIA: "Dynamische Probleme bei Brücken- und Hochbauten". SIA Dokumentation D0138. Zürich 1996.

[VB87] Vogt R., Bachmann H.: "Dynamische Kräfte beim Klatschen, Fussstampfen und Wippen". IBK Bericht Nr. 7501-4, 1987.

## 7.2 Schwingungsbegrenzung

### 7.2.1 Nachweiskonzepte

- Frequenzabstimmung



- Hochabstimmung (unterkritische Erregung)
- Tiefabstimmung (überkritische Erregung)

- Amplitudenbegrenzung

### 7.2.2 Massnahmen

- Ändern der Eigenfrequenz

Strategie	Auswirkung
	$\left. \begin{array}{l} \text{Steifigkeit: } I \sim bh^3 \\ \text{Masse: } A \sim bh \end{array} \right\} \Rightarrow f \sim \sqrt{\frac{I}{A}} \sim h$
	$f_{a,1} = \frac{\pi^2}{2\pi L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \quad (\mu = \text{verteilte Masse})$
	$f_{b,1} = \frac{3.93^2}{2\pi L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}} = 1.56 f_{a,1} \quad (2.45 \cdot EI)$
	$f_{c,1} = \frac{4.73^2}{2\pi L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}} = 2.27 f_{a,1} \quad (5.14 \cdot EI)$
	$f_{d,1} = \frac{\pi^2}{2\pi(L/2)^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}} = 4 f_{a,1} \quad (16 \cdot EI)$

- Erhöhung der Dämpfung
  - Einbau von Dämpfungselementen
  - Plastische Energiedissipation
- Schwingungstilger

### 7.2.3 Berechnungsmethoden

- Bestimmung der Eigenfrequenzen

Eigenfrequenzen von Tragwerken sind in der Regel an wirklichkeitsnahen Modellen zu bestimmen. Näherungsformeln die oft in den Normen zu finden sind, sind sorgfältig zu überprüfen.

- Bestimmung der Amplituden

Falls die Frequenz von einer Harmonischen der Anregung mit einer Eigenfrequenz des Tragwerks übereinstimmt (Resonanz), kann die maximale Auslenkung des Tragwerks wie folgt geschätzt werden (siehe Abschnitt 4):

$$u_p = \frac{F_o}{k} \cdot V(\omega) \cdot \cos(\omega t - \phi) \quad (7.1)$$

für  $\omega = \omega_n$  gilt es  $V(\omega) = 1/(2\zeta)$  und:

$$u_{\max} = \frac{F_o}{k} \cdot \frac{1}{2\zeta} \quad (7.2)$$

Die maximale Geschwindigkeit und die maximale Beschleunigung können daraus bestimmt werden:

$$\dot{u}_{\max} = \omega \cdot u_{\max} = \omega \cdot \frac{F_o}{k} \cdot \frac{1}{2\zeta} \quad (7.3)$$

$$\ddot{u}_{\max} = \omega^2 \cdot u_{\max} = \omega^2 \cdot \frac{F_o}{k} \cdot \frac{1}{2\zeta} \quad (7.4)$$

Die Amplitude der n-ten Harmonischen von einer durch Menschen erzeugten Anregungskraft ist proportional zur Masse der Person ( $F_o = G \cdot \alpha_n = g \cdot M \cdot \alpha_n$ , siehe Gleichung (7.8))

$$\ddot{u}_{\max} = \omega^2 \cdot \frac{g \cdot M \cdot \alpha_n}{k} \cdot \frac{1}{2\zeta} = \frac{k}{m} \cdot \frac{g \cdot M \cdot \alpha_n}{k} \cdot \frac{1}{2\zeta} = \frac{M}{m} \cdot \frac{g \cdot \alpha_n}{2\zeta} \quad (7.5)$$

$$\ddot{u}_{\max} = \frac{M}{m} \cdot \frac{g \cdot \alpha_n}{2\zeta} \quad (7.6)$$

- Bemerkungen

- Ein weiches Tragwerk ist schwingungsanfälliger als ein steifes Tragwerk. Siehe Gleichungen (7.2) bis (7.4).
- Die Beschleunigungsamplitude ist direkt abhängig vom Verhältnis der Personenmasse zur Bauwerksmasse.

### 7.3 Menschenerregte Schwingungen

#### 7.3.1 Anregungskräfte

Im Abschnitt "Systeme mit einem Freiheitsgrad - Erzwungene Schwingungen" wurde bereits erwähnt, dass Anregungen durch Menschen wie Gehen, Laufen, Hüpfen, usw. sich als Fourier-Reihen wie folgt darstellen lassen:

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (7.7)$$

Gleichung (7.7) lässt sich ebenfalls in einer Form gemäss Gleichung (7.8) darstellen:

$$F(t) = G + \sum_{n=1}^N G \cdot \alpha_n \cdot \sin(n \cdot 2\pi f_0 \cdot t - \phi_n) \quad (7.8)$$

Wobei:

- $G$  = Gewicht der Person
- $\alpha_n$  = Fourier-Koeffizient für die n-te Harmonische
- $G \cdot \alpha_n$  = Amplitude der n-ten Harmonischen der Anregungskraft
- $f_0$  = Schrittfrequenz der Anregungskraft
- $\phi_n$  = Phasenverschiebung der n-ten Harmonischen ( $\phi_1 = 0$ )
- $n$  = Nummer der n-ten Harmonischen
- $N$  = Anzahl der berücksichtigten Harmonischen

Die stationäre Antwort eines EMS infolge periodischer Anregung  $F(t)$  lässt sich ähnlich wie im Abschnitt "EMS - Erzwungene Schwingungen" bestimmen und zwar wie folgt:

$$u(t) = u_0(t) + \sum_{n=1}^N u_n(t) \quad (7.9)$$

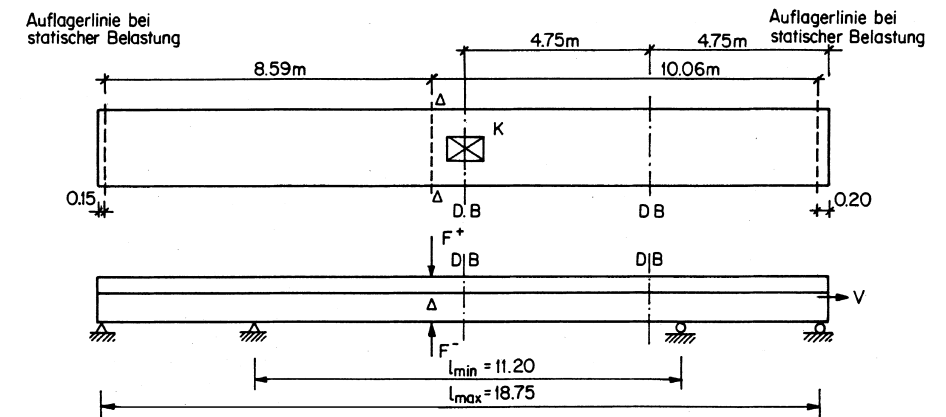
Wobei

$$u_0(t) = \frac{G}{k} \text{ (Statische Verschiebung)} \quad (7.10)$$

$$u_n(t) = \frac{G \cdot \alpha_n}{k} \cdot \frac{(1 - \beta_n^2) \sin(n\omega_0 t - \phi_n) - 2\zeta\beta_n \cos(n\omega_0 t - \phi_n)}{(1 - \beta_n^2)^2 + (2\zeta\beta_n)^2} \quad (7.11)$$

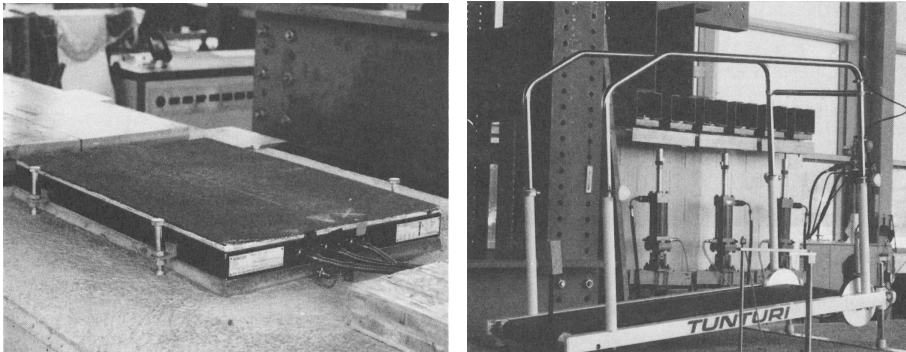
$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad , \quad \beta_n = \frac{n\omega_0}{\omega_n} \quad (7.12)$$

#### • Messung der Kräfte (Beispiel)

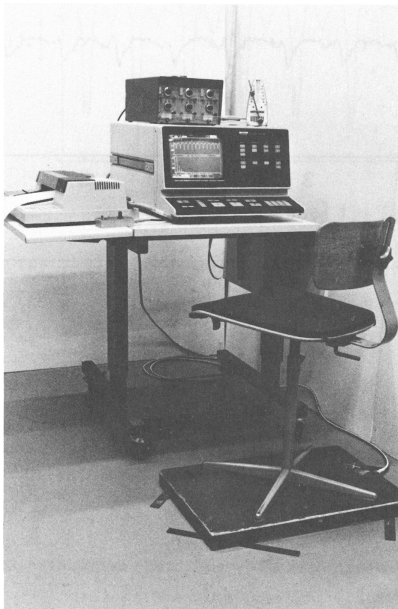




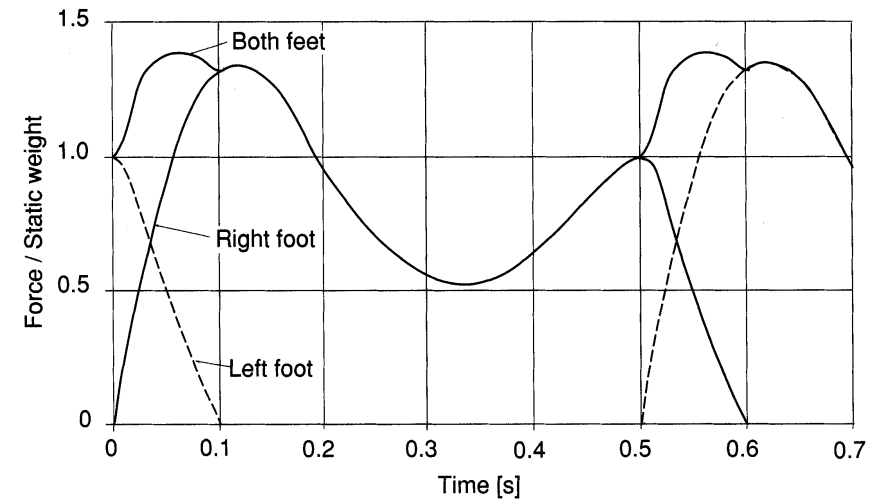
- Hüpfen (links) und Laufen (Rechts), siehe [BB88]



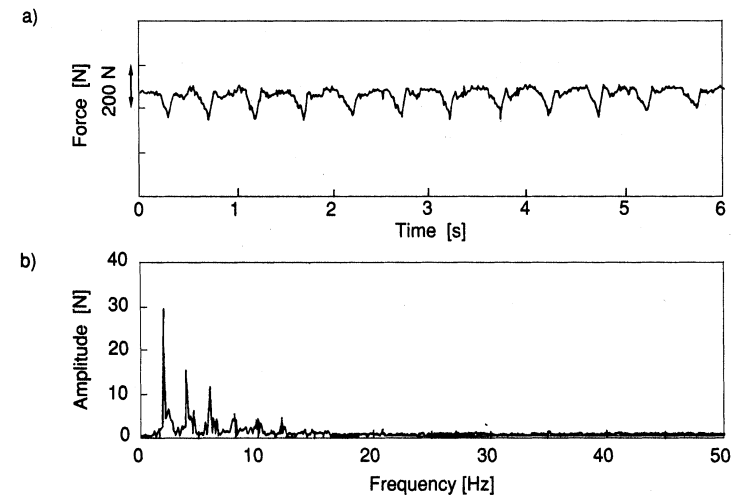
- Klatschen, Fusstampfen und Wippen, siehe [VB87]



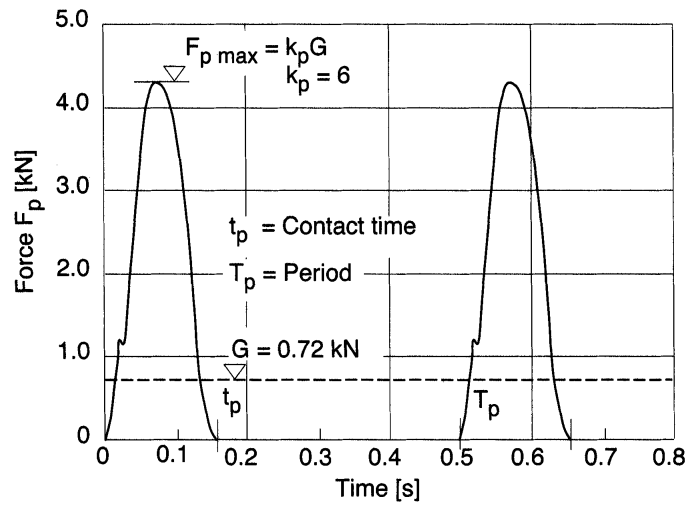
- Laufen (siehe [Bac+97] Bild G.1)



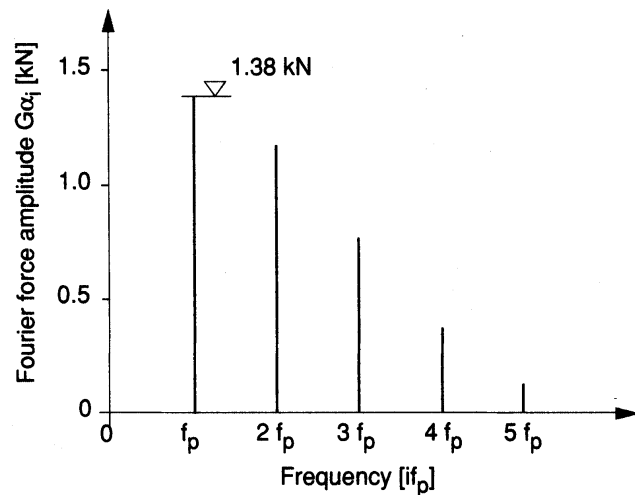
- Klatschen (siehe [Bac+97] Bild G.3)



- Hüpfen (siehe [Bac+97] Bild G.2)



- Hüpfen: Fourieramplitudenspektrum (siehe [Bac+97] Bild G.2)



Representative types of activity		Range of applicability	
Designation	Definition	Design activity rate [Hz]	Actual activities
"walking"	walking with continuous ground contact	1.6 to 2.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>slow walking (ambling) ~ 1.7</li> <li>normal walking ~ 2.0</li> <li>fast, brisk walking ~ 2.3</li> </ul>
"running"	running with discontinuous ground contact	2.0 to 3.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>slow running (jog) ~ 2.1</li> <li>normal running ~ 2.5</li> <li>fast running (sprint) &gt; 3.0</li> </ul>
"jumping"	normal to high rhythmical jumping on the spot with simultaneous ground contact of both feet	1.8 to 3.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>fitness training with jumping, skipping and running to rhythmical music ~ 1.5 to 3.4</li> <li>jazz dance training ~ 1.8 to 3.5</li> </ul>
"dancing"	approximately equivalent to "brisk walking"	1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>social events with classical and modern dancing (e.g. English Waltz, Rumba etc.) ~ 1.5 to 3.0</li> </ul>
"hand clapping with body bouncing while standing"	rhythmical hand clapping in front of one's chest or above the head while bouncing vertically by forward and backward knee movement of about 50 mm	1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>pop concerts with enthusiastic audience ~ 1.5 to 3.0</li> </ul>
"hand clapping"	rhythmical hand clapping in front of one's chest	1.5 to 3.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>classical concerts, "soft" pop concerts ~ 1.5 to 3.0</li> </ul>
"lateral body swaying"	rhythmical lateral body swaying while being seated or standing	0.4 to 0.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>concerts, social events</li> </ul>
			Structure type
			<ul style="list-style-type: none"> <li>pedestrian structures (pedestrian bridges, stairs, piers, etc.)</li> <li>office buildings, etc.</li> <li>pedestrian bridges on jogging tracks, etc.</li> <li>gymnasias, sport halls</li> <li>gymnastic training rooms</li> <li>dance halls</li> <li>concert halls and other community halls without fixed seating</li> <li>concert halls and spectator galleries with and without fixed seating and "hard" pop concerts</li> <li>concert halls with fixed seating (no "hard" pop concerts)</li> <li>spectator galleries</li> </ul>

Charakterisierung von menschlichen Aktivitäten aus [Bac+97] Tabelle G.1

Representative type of activity	Activity rate [Hz]	Fourier coefficient and phase lag						Design density [persons/m <sup>2</sup> ]
		$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\phi_2$	$\alpha_3$	$\phi_3$		
"walking"	vertical	0.4	0.1	$\pi/2$	0.1	$\pi/2$	~1	
	forward	0.5	0.1					
	lateral	0.2						
		$\alpha_{1/2} = 0.1$	$\alpha_{3/2} = 0.1$					
"running"	2.0 to 3.0	1.6	0.7		0.2		-	
"jumping"	normal	1.8	1.3	*	0.7	*	in fitness training ~ 0.25 (in extreme cases up to 0.5)	
	high	1.7	1.1	*	0.5	*		
		1.9	1.6	*	1.1	*	*) $\phi_2 = \phi_3 = \pi(1-f_p)$	
		1.8	1.3	*	0.8	*		
"dancing"	2.0 to 3.0	0.5	0.15		0.1		~ 4 (in extreme cases up to 6)	
"hand clapping with body bouncing while standing"		0.17	0.10		0.04		no fixed seating ~ 4 (in extreme cases up to ~ 6) with fixed seating ~ 2 to 3	
		0.38	0.12		0.02			
"hand clapping"	normal	1.6	0.024		0.010		~ 2 to 3	
	intensive	2.4	0.047		0.024	0.009		
		2.0	0.170		0.047	0.015		
"lateral body swaying"	seated	0.6	$\alpha_{1/2} = 0.4$		-		~ 3 to 4	
	standing	0.6	$\alpha_{1/2} = 0.5$		-			

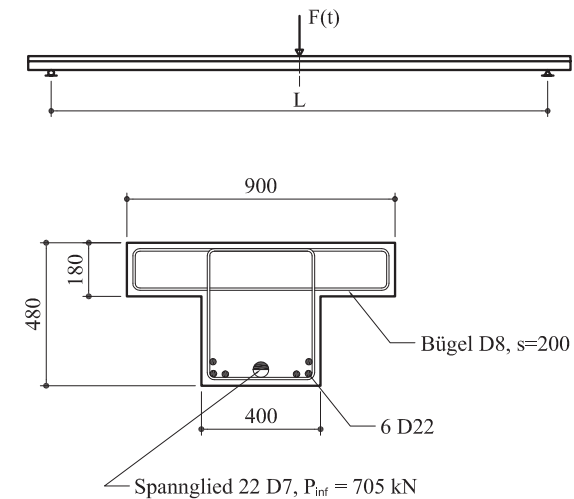
Fourier-Koeffizienten für menschliche Aktivitäten aus [Bac+97] Tabelle G.2

• Bemerkungen zu Tabelle G.2

- Koeffizienten und Phasenwinkel stellen Mittelwerte dar.
- Phasenwinkel weisen starke Streuungen auf und es ist deshalb in vielen Fällen schwierig, vernünftige Mittelwerte anzugeben. Bei solchen Fällen (z.B. Laufen und Tanzen) wurden in Tabelle G.2 keine Werte angegeben.
- Massgebend sind Fälle bei welchen Resonanz auftritt. Dort spielen die Phasenwinkel keine Rolle mehr.
- Die Koeffizienten und Phasenwinkel wurden international diskutiert und überprüft

7.3.2 Beispiel: Hüpfen auf Stahlbetonbalken

Das Beispiel, das im Abschnitt 5.1.3 betrachtet wurde, wird hier nochmals behandelt.



• Balken

Der Balken hat eine Länge von 19 Meter. Die Eigenfrequenz beträgt somit:

$$f_n = 2\text{Hz}. \tag{7.13}$$

• Anregung

Das "Hüpfen" wird hier mit der Fourier-Reihe aus Tabelle G.2 beschrieben. Bei der "Periodischen Anregung" wurde das "Hüpfen" anhand von einem Halbsinus beschrieben.

Hüpf Frequenz:  $f_0 = 2\text{Hz}$  (7.14)

Kontaktzeit:  $t_p = 0.16\text{s}$  (Berechnung Phasenwinkel) (7.15)

Gewicht Person:  $G = 0.70\text{kN}$  (7.16)

• Resultate

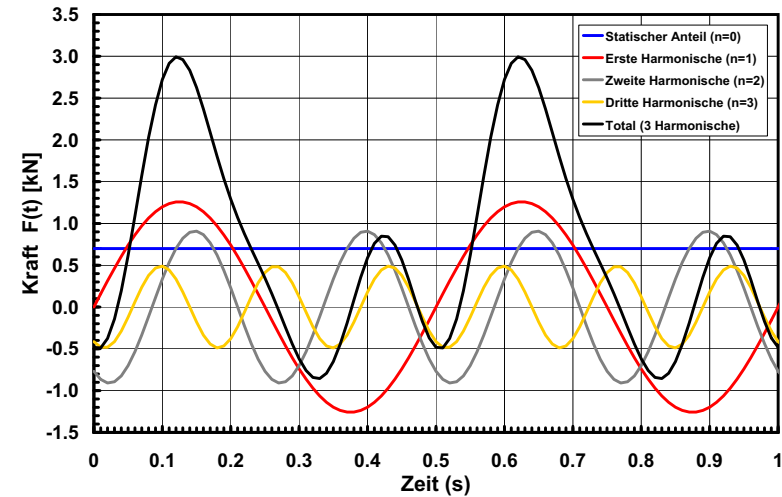
Excel Tabelle:  $u_{\max} = 0.043\text{m}$  (7.17)

Gleichung (7.2):  $u_{\max} = \frac{F}{k} \cdot \frac{1}{2\zeta} = \frac{1.8 \cdot 0.70}{886} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0.017} = 0.042\text{m}$  (7.18)

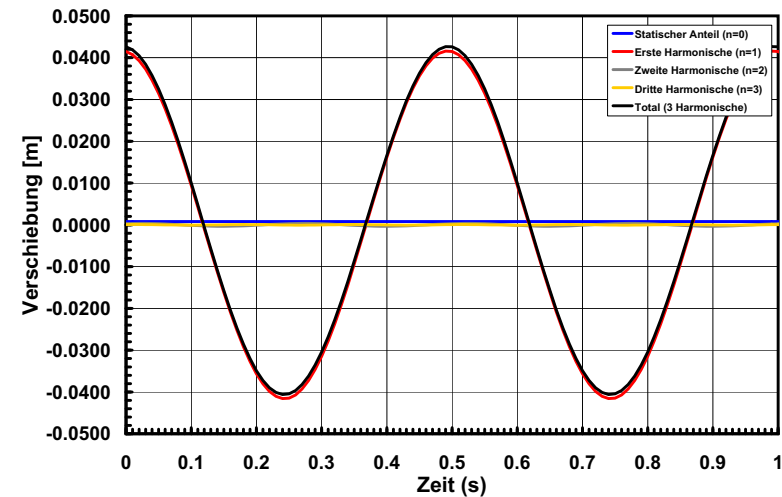
• Bemerkungen

- Form der Anregung "ähnlich" wie Halbsinus
- Maximale Auslenkung wie Halbsinus

• Anregung



• Antwort

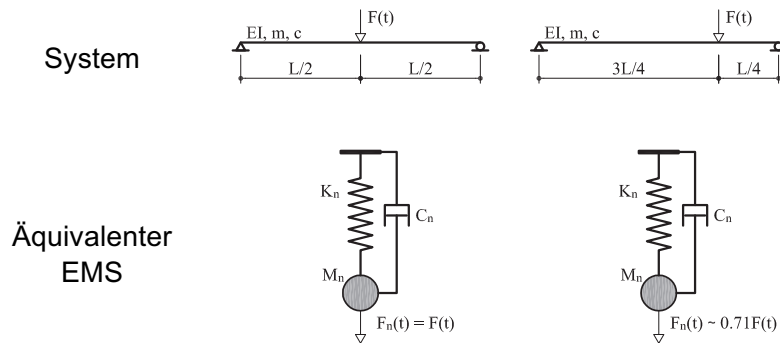


### 7.3.3 Fussgängerbrücken

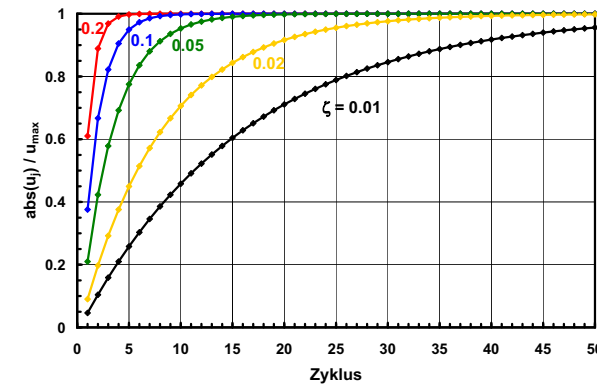
- Frequenzabstimmung
  - **Vertikal:** Eigenfrequenz zwischen 1.6 und 2.4Hz vermeiden. Bei schwach gedämpften Träger (Stahl) auch 3.5 bis 4.5Hz vermeiden.
  - **Horizontal quer:** Eigenfrequenz zwischen 0.7 und 1.3Hz vermeiden (absolut sicher:  $f_{hq,1} > 3.4\text{Hz}$ ).
  - **Horizontal längs:** Eigenfrequenz zwischen 1.6 und 2.4Hz vermeiden.
- Amplitudenbegrenzung
  - Berechnung der maximalen Beschleunigungsamplitude.

$$a_{\max} < \text{ca. } 0.5\text{m/s}^2 = 5\% g \quad (7.19)$$

- Besonderheiten bei der Amplitudenbegrenzung
  - Beim Gehen oder Laufen ist die Wirksamkeit der Menschen beschränkt, weil die Kräfte nicht immer in Feldmitte abgegeben werden;



- Menschen brauchen eine finite Anzahl von Schritten, um die Brücke zu überqueren (Beschränkte Anregungszeit, eventuell zu kurz, um die maximale Amplitude zu bekommen)



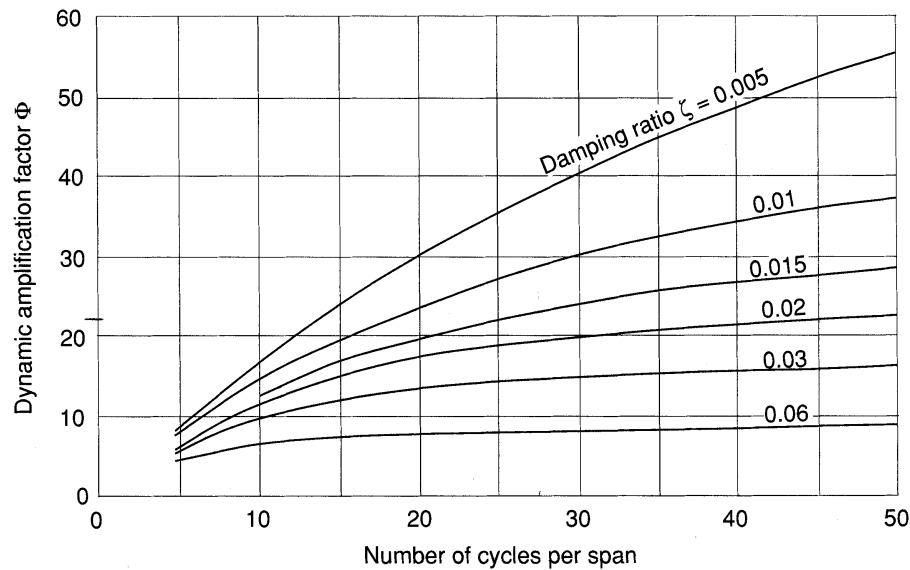
- Nicht alle Personen laufen im Schritt (Ausnahme: Querschwingung → Synchronisationseffekt)

Um die Besonderheiten der Amplitudenbegrenzung berücksichtigen zu können, sind verfeinerte Methoden vorhanden. Aus [BAC+97] wird folgende Methode übernommen:

$$a_{\max} = 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot y \cdot \alpha \cdot \Phi \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (7.20)$$

Wobei:

- $y$ : Statische Einsenkung bei der halben Spannweite
- $\alpha$ : Fourier-Koeffizient
- $\Phi$ : dynamischer Vergrößerungsfaktor



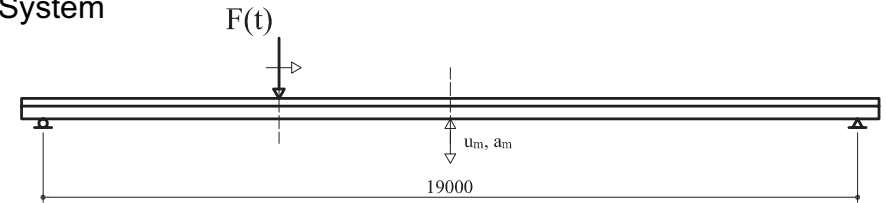
Um die Tatsache zu berücksichtigen, dass nicht alle Personen im Gleichschritt über die Brücke gehen, muss nicht die volle Anzahl Menschen, die auf der Brücke sind, berücksichtigt werden.

Oft wird als Multiplikationsfaktor die Quadratwurzel der Anzahl Menschen gewählt.

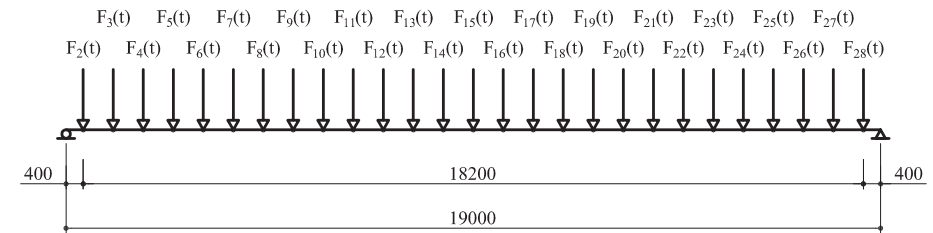
• Beispiel: "Gehen auf Stahlbetonbalken"

• Situation

System



Diskretisierung für FE Analyse



- Steifigkeit in Balkenmitte:  $K_n = 886 \text{ kN/m}$
- Eigenfrequenz:  $f_n = 2 \text{ Hz}$
- Dämpfung:  $\zeta = 0.017$

• Anregung

- Gehen mit  $f_0 = 2 \text{ Hz}$  gemäss Tabelle G.2.
- Schrittlänge:  $S = 0.70 \text{ m}$
- Gewicht der Person:  $G = 1 \text{ kN}$

- Grobe Schätzung der maximalen Verschiebungsgrößen

Die maximale Verschiebung und die maximale Beschleunigung werden anhand von Gleichungen (7.2) und (7.4) geschätzt:

$$u_{\max, \text{st}} = \frac{G}{K_n} = \frac{1}{886} = 0.001128 \text{m} = 0.11 \text{cm} \quad (7.21)$$

$$u_{\max, 1} = \frac{G \cdot \alpha_1}{K_n} \cdot \frac{1}{2\zeta} = \frac{1 \cdot 0.4}{886} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0.017} = 0.0133 \text{m} = 1.33 \text{cm} \quad (7.22)$$

$$u_{\max} = 0.11 + 1.33 = 1.44 \text{cm} \quad (7.23)$$

$$a_{\max} = \omega^2 u_{\max, 1} = (2\pi \cdot 2)^2 \cdot 0.0133 = 2.10 \text{m/s}^2 \quad (7.24)$$

- Schätzung der maximalen Verschiebungsgrößen anhand des verbesserten Verfahrens

Die maximale Beschleunigung wird anhand von Gleichung (7.20) berechnet:

$$\text{Geh-Geschwindigkeit: } v = S \cdot f_0 = 0.7 \cdot 2 = 1.4 \text{m/s} \quad (7.25)$$

$$\text{Überquerungszeit: } \Delta t = L/v = 19/1.4 = 13.57 \text{s} \quad (7.26)$$

$$\text{Anzahl Zyklen: } N = \Delta t \cdot f_n = 13.57 \cdot 2 = 27 \quad (7.27)$$

$$\text{Vergrößerungsfaktor: } \Phi = 23 \quad (7.28)$$

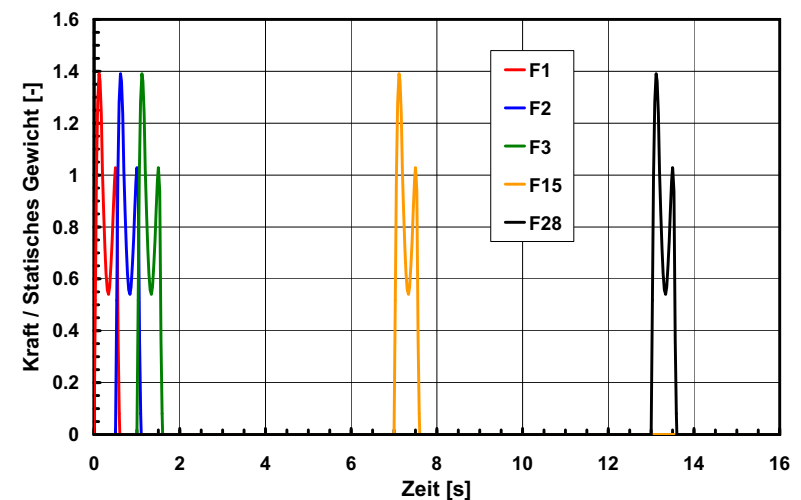
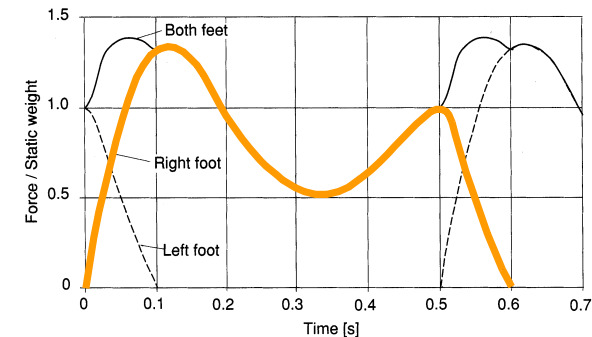
Aus Gleichung (7.20):

$$a_{\max} = 4\pi^2 \cdot 2^2 \cdot \frac{1.00}{886} \cdot 0.40 \cdot 23 = 1.64 \text{m/s}^2 \quad (7.29)$$

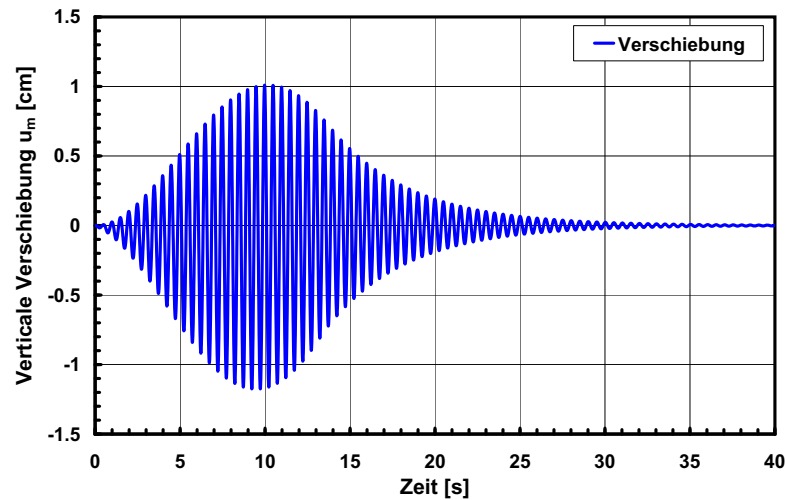
- Berechnung der Verschiebungsgrößen anhand des FE Programms ABAQUS

Die Verschiebungsgrößen werden anhand einer Zeitverlaufberechnung bestimmt:

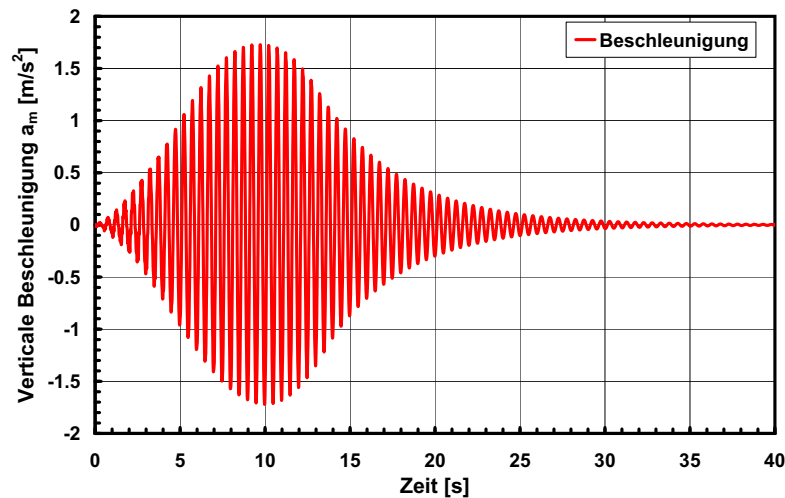
- Anregung



## - Zeitverlauf der Verschiebung



## - Zeitverlauf der Beschleunigung



## • Bemerkungen

- Das verfeinerte Verfahren und die Zeitverlaufsrechnung zeigen tiefere Werte im Vergleich zum groben Verfahren
- Das verfeinerte Verfahren und die Zeitverlaufsrechnung sind in guter Übereinstimmung
- Der Zeitverlauf der **Verschiebung** ist **nicht** symmetrisch um die Zeitachse (Statischer Anteil der Verformung);
- Der Zeitverlauf der **Beschleunigung** ist symmetrisch um die Zeitachse (Kein statischer Anteil der Verformung);

## • Schwingende Fussgängerbrücke im Internet

<http://www.arup.com/millenniumbridge/>

<http://www.youtube.com>



### 7.3.4 Decken in Wohn- und Bürogebäuden

• Frequenzabstimmung

- Falls die Anregung durch Gehen erzeugt wird ( $f_{max} \cong 2.4\text{Hz}$ ), sollen folgende Frequenzen eingehalten werden:

Dämpfung	Eigenfrequenz [Hz]	Bemerkung
> 5%	> 5	Resonanz durch 2 Harmonische vermeiden
< 5%	> 7.5	Resonanz durch 3 Harmonische vermeiden

• Amplitudenbegrenzung

- Berechnung der maximalen Beschleunigungsamplitude

$$a_{max} < \text{ca. } 0.05\text{m/s}^2 = 0.5\% g \tag{7.30}$$

- Wegen vielen nicht-tragenden Bauteilen (Tapeten, Möbeln, untergehängte Decken, technische Böden, Zwischenwänden, .... ) ist die Schätzung der dynamischen Eigenschaften von Decken schwierig.
- Wo möglich dynamische Eigenschaften messen.

### Antwort von Menschen auf Erschütterungen

Die Empfindlichkeit von Menschen auf Erschütterungen hängt von vielen Parametern ab:

- Stellung (Stehen, Sitzen, Liegen)
- Einwirkungsrichtung gegenüber Wirbelsäule
- Aktivität (Ruhem, Gehen, Laufen, ...)
- Art der Schwingung
- ....

Beschreibung	Frequenz 1 bis 10 Hz $a_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	Frequenz 10 bis 100 Hz $v_{max}$ [m/s]
Knapp spürbar	0.034	0.0005
Deutlich spürbar	0.1	0.0013
Störend	0.55	0.0068
Nicht ertragbar	1.8	0.0138

Vertikale harmonische Schwingung auf stehende Person wirkend. Akzeptierte Mittelwerte; Streuungen bis zu einem Faktor 2 möglich (aus [Bac+97])

• ISO Norm 2631

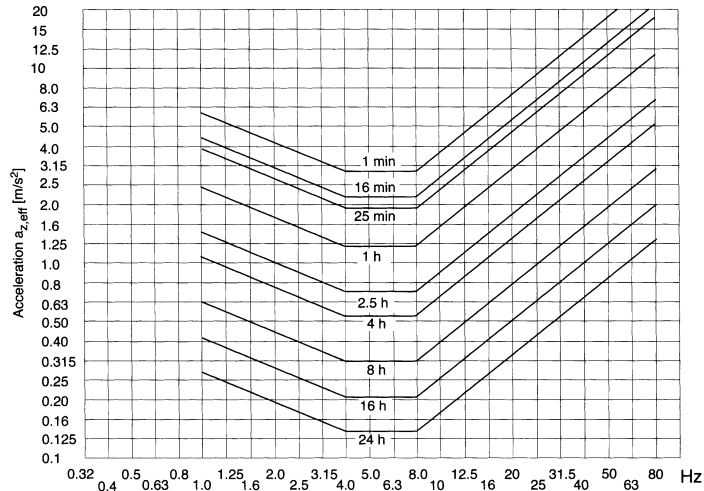
$$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \tag{7.31}$$

Wobei T die Periode ist, über welche die effektive Beschleunigung gemessen wurde.

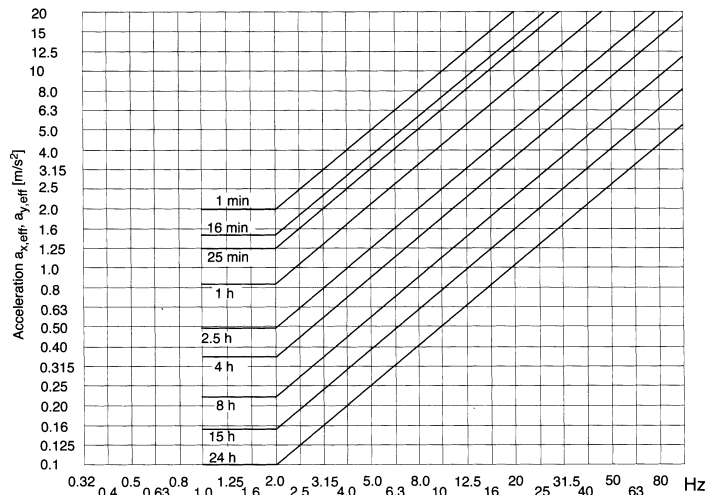
Es werden 3 Grenzen definiert

- G1: "Reduced comfort boundary"
- G2: "Fatigue-decreased proficiency boundary" ~ 3 x G1
- G3: "Exposure limit" ~ 6 x G1

- Grenze G2 für Erschütterungen parallel zur Wirbelsäule



- Grenze G2 für Erschütterungen quer zur Wirbelsäule



### 7.3.5 Turnhallen und Tanzsäle

Infolge Turnen oder Tanzen können riesige dynamische Kräfte entstehen. Dies ist leicht ersichtlich wenn die Fourier-Koeffizienten aus Tabelle G2 angeschaut werden:

- Gehen:  $\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.1, \alpha_3 = 0.1$
- Laufen:  $\alpha_1 = 1.6, \alpha_2 = 0.7, \alpha_3 = 0.2$
- Hüpfen:  $\alpha_1 = 1.9, \alpha_2 = 1.6, \alpha_3 = 1.1$
- Tanzen:  $\alpha_1 = 0.5, \alpha_2 = 0.15, \alpha_3 = 0.1$   
(aber: a - viele Leute die sich rhythmisch bewegen. b - gewisse Tänze sind Hüpfen sehr ähnlich)

- Frequenzabstimmung

- Anregung durch Hüpfen ( $f_{max} \cong 3.4\text{Hz}$ ) oder Tanzen ( $f_{max} \cong 3.0\text{Hz}$ ). Folgende Frequenzen sind einzuhalten:

Konstruktion	Turnhallen Eigenfrequenz [Hz]	Tanzsäle Eigenfrequenz [Hz]
Stahlbeton	> 7.5	> 6.5
Vorspannbeton	> 8.0	> 7.0
Verbund	> 8.5	> 7.5
Stahl	> 9.0	> 8.0

- Amplitudenbegrenzung

- Berechnung der maximalen Beschleunigungsamplitude

$$a_{max} < \text{ca. } 0.5\text{m/s}^2 = 5\% g \tag{7.32}$$

- Grenze abhängig von der Aktivität. Z.B. falls Leute im Tanzlokal auch sitzen, soll die Grenze reduziert werden.
- Wegen der grossen Kräfte die Entstehen können, sollen die dynamischen Eigenschaften des Tragwerks möglichst gut geschätzt werden.

### 7.3.6 Konzertsäle, Tribünen und Sprungtürme

Siehe [Bac+97].

## 7.4 Maschinenerregte Schwingungen

Es ist hier nicht möglich eine ausführliche Behandlung der maschinenerregten Schwingungen durchzuführen. Es wird vorläufig auf [Bac+97] verwiesen.

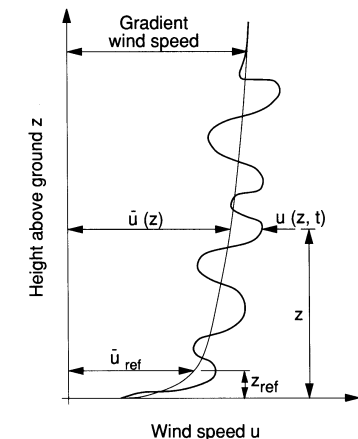
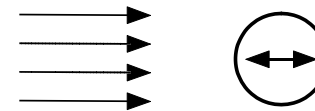
## 7.5 Winderregte Schwingungen

Winderregte Schwingungen sind ein sehr anspruchvolles und breites Gebiet. Es ist hier nicht möglich eine ausführliche Behandlung durchzuführen. Es wird auf die entsprechende Literatur verwiesen:

- [Bac+97]
- Simiu E., Scanlan R.H.: "Wind Effects on Structures". Third Edition. John Wiley & Sons, 1996.

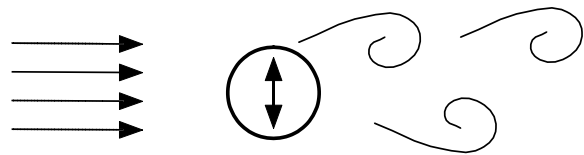
### 7.5.1 Mögliche Effekte

- **Böen:** Stochastische Einwirkung in Windrichtung
  - Turbulenter Wind mit örtlich und zeitlich variabler Windgeschwindigkeit



• **Wirbelablösung:** Periodische Einw. quer zur Windrichtung

- Wirbel links und rechts lösen sich nicht gleichzeitig ab. Wenn der zeitliche Abstand der Wirbelablösungen gleich der Schwingzeit des Bauwerks ist, herrscht Resonanzanregung.



$$u_{crit} = \frac{f_c \cdot d}{S} \quad (7.33)$$

$u_{crit}$ : Kritische Windgeschwindigkeit

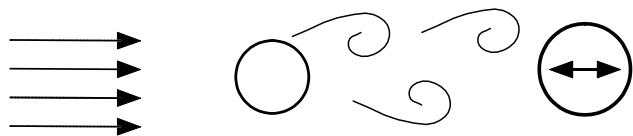
$f_c$ : Eigenfrequenz des Bauwerks quer zur Windrichtung

$d$ : Durchmesser des Bauwerks

$S$ : Strouhalzahl (ca. 0.2 für Kreisquerschnitte)

• **Puffern (Buffeting):** Periodische Einw. in Windrichtung

- An einem Hindernis abgelöste Wirbel treffen auf das Bauwerk.



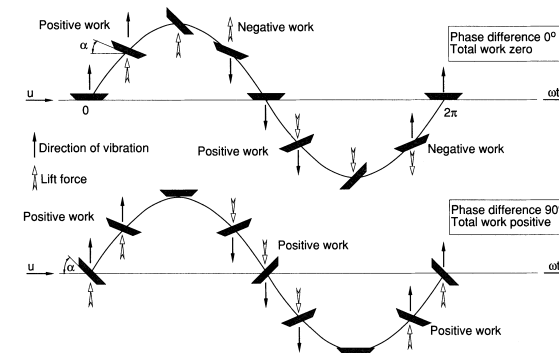
• **“Galopping” und “Flutter”:**

Instabile Interaktion zwischen Windströmung und Strukturbe-  
wegung

- **Galopping:** Bewegung der Struktur quer zu Strömungs-  
richtung.

- **Flutter:** kombinierte Biege-Torsion-Bewegung der Struktur.

Arbeit der Windkräfte bei Flattern



Stabilitätskurven für Brückenquerschnitte

