RFS2-CT-2007-00033

Research Fund for Coal & Steel

Hivoss

Human induced Vibrations of Steel Structures

Bemessung von Fußgängerbrücken

Erläuterungen

RWTH AACHEN UNIVERSITY

ArcelorMittal

TNO

SCI

cticm

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

Schlaich Bergermann und Partner
Beratende Ingenieure im Bauwesen

Inhaltsverzeichnis

Häufig verwendete Symbole

a_{limit}	Zu einer Komfortklasse zugehörige Grenzbeschleunigung	[m/s²]
a_{max}	Zu einer Bemessungssituation zugehörige berechnete maximale Beschleunigung	[m/s²]
B	Breite	[m]
d	Dichte des Fußgängerstroms auf der Brücke	[P/m²]
f, f_i	Eigenfrequenz bzw. Eigenfrequenz der i-ten Eigenform/Mode	[Hz]
f_s	Schrittfrequenz eines Fußgängers	[Hz]
P	Statische Last des einzelnen Fußgängers	[N]
$P \times \cos(2\pi ft)$	Harmonische Belastung infolge eines einzelnen Fußgängers	[N]
L	Länge	[m]
m	Anzahl der Sinushalbwellen einer Modalform	[-]
m^*	Modale Masse	[kg]
M	Masse	[kg]
n	Anzahl der Fußgänger auf der belasteten Fläche S ($n = S \times \mathrm{d}$)	[P]
n'	Äquivalente Anzahl Fußgänger auf der belasteten Fläche S	[P/m²]
$p(t)$	Verkehrlast als Flächenlast	[kN/m²]
P_{mov}	Wanderlast	[kN]
S	belastete Fläche	[m²]
δ	Logarithmisches Dekrement der Dämpfung	[-]
μ	Masse der Brücke pro Längeneinheit	[kg/m]
μ_D	Masse des Brückendecks pro Längeneinheit	[kg/m]
μ_P	Masse der Fußgänger pro Längeneinheit	[kg/m]
ρ	Einflussfaktor für zusätzliche Füßgängermasse	[-]

$\Phi(x)$	Modalform	[-]
ψ	Faktor zur Berücksichtigung der Möglichkeit, dass Schrittfrequenzen im Bereich der betrachteten Eigenfrequenz liegen.	[-]
ξ	Dämpfungsgrad (Lehr'sches Dämpfungsmaß)	[-]

1 Einführung

In den letzten Jahren ist die Nachfrage nach leichten Fußgängerbrücken deutlich gestiegen. Durch die geringe Brückenmasse können dynamische Einwirkungen bei leichten Brücken viel größere Schwingungsamplituden verursachen. Durch die große Schlankheit der Brücken steigt die Anfälligkeit gegenüber Schwingungen zusätzlich.

Die zunehmende Anzahl der modernen Fußgängerbrücken, an denen Schwingungsprobleme auftraten zeigt, dass Fußgängerbrücken in Zukunft nicht nur auf die statische Beanspruchung bemessen werden sollten. Auf der anderen Seite führen Anforderungen an die Eigenfrequenz der Brücke, wie in einigen Normen vorgesehen ([1], [2], [3], [4]) zu Einschränkungen im Tragwerksentwurf von Fußgängerbrücken: sehr schlanke und sehr leichte Brücken wie zum Beispiel Spannbandbrücken oder Hängebrücken könnten die Anforderungen nicht erfüllen. Vielmehr wird das dynamische Verhalten der Brücke nicht nur durch ihre Eigenfrequenz sondern auch im Zusammenhang mit der Dämpfung, der Brückenmasse und der Verkehrsbeanspruchung durch Fußgänger bestimmt. Richtlinien für die Bemessung sollten daher alle diese Einflussfaktoren berücksichtigen, so dass jede Brücke bemessen und errichtet werden kann, deren Anforderungen hinsichtlich des Schwingungskomforts nachgewiesen werden können. Nur wenn geforderte Komforteigenschaften nicht eingehalten werden, sollten Eingriffe in das Tragwerk oder das Dämpfungsverhalten erfolgen.

Die geringe Massenträgheit leichter Brücken mit den damit verbundenen geringen Eigenfrequenzen führen ebenfalls zu größerer Resonanzgefahr. Diese Resonanzgefahr besteht gerade dann, wenn die Erregerfrequenz (hier die Schrittfrequenz der Fußgänger), mit der Eigenfrequenz der Brücke zusammenfällt. Die für Fußgängerbrücken maßgebende Beanspruchung durch gehende Personen ist impulsartig anhaltend und findet in einem engen Frequenzspektrum statt. Es liegt daher auf der Hand, dass das Schwingungsverhalten einer Brücke bemessungsrelevant sein kann. Diese Schwingungen betreffen vor allem die Gebrauchstauglichkeit der Brücke im Hinblick z.B. auf die Wahrnehmbarkeit der Schwingungen. Brückeneinstürze oder Beschädigungen infolge Fußgängereinwirkung sind nicht bekannt.

Durch Gehen oder Laufen können an Fußgängerbrücken vertikale und horizontale Schwingungen auftreten, während die durch Radfahrer eingebrachten Schwingungen im Vergleich dazu vernachlässigbar sind.

In den letzten Jahren wurden einige Brücken durch Personenströme in seitliche Schwingung versetzt, wobei eine gegenseitige Beeinflussung von Brückenschwingung und Personenlast zu beobachten war. Die dadurch entstandene aufgeschaukelte Schwingung führte zu nicht mehr tolerierbaren Brückenbewegungen. Fußgängerbrücken sollten so bemessen werden, dass dieser „Lock-in"-Effekt nicht auftritt.

In einer zeitgemäßen Brückenplanung sollten daher fußgängerinduzierte Schwingungen berücksichtigt werden, um:

- Schwingungen durch Fußgänger in einem akzeptablen Rahmen zu halten,
- Das Auftreten des Lock-in-Effektes zu vermeiden,
- Einen Schaden durch Vandalismus auszuschließen.

Für die Erstellung eines Leidfadens, der dem Tragwerksplaner bei Entwurf und Bemessung als Hilfe dienen soll, wurden an zahlreichen Fußgängerbrücken Messungen und Simulationsberechnungen durchgeführt. Der Leitfaden enthält Angaben zu:

- Anforderungen an die Bemessung,
- Komfortklassen, die durch Beschleunigungen angegeben werden,
- Lastmodelle zur Abbildung von Personenströmen und
- Ein Kriterium zur Vermeidung des Lock-in Effektes.

Für schwingungsanfällige Brücken, die eventuell keinen ausreichenden Schwingungskomfort besitzen, werden zusätzliche Informationen gegeben in Bezug auf:

- Verfahren zur Messung von Schwingungen und zur Auswertung der Messergebnisse zur Bestimmung der dynamischen Brückeneigenschaften,
- Möglichkeiten zur Modifizierung des Tragwerkes und den Einbau von Dämpfern.

2 Definitionen

Keine zusätzlichen Hintergrundinformationen zum Leitfaden.

3 Bemessungsverfahren

Es wird empfohlen, die dynamischen Einwirkungen und das Schwingungsverhalten der Brücke bereits in frühen Entwurfsstadien, auch wenn Angaben zur Gründung oder zur Dämpfung noch fehlen oder zu bestimmen sind, durchzuführen. In diesem Fall gibt die dynamische Berechnung zwar nur einen Eindruck vom wirklichen Schwingungsverhalten, allerdings sollten Vorsorgemaßnahmen für Dämpfer schon im frühen Entwurfsstadium vorgesehen werden. Die Dämpfung und die auftretenden Beschleunigungen würden dann nach Fertigstellung der Brücke messtechnisch ermittelt. Anhand dieser Messergebnisse sollte dann festgelegt werden, ob zusätzliche Dämpfer erforderlich sind.

4 Bemessungsschritte

4.1 Schritt 1: Bestimmung der Eigenfrequenzen

Die Eigenfrequenzen können durch Handformeln oder einfache Verfahren berechnet werden. Liegen sie aber dicht an den kritischen Frequenzen, dann sollten genauere Verfahren für ihre Bestimmung verwendet werden. Es ist mittlerweile weit verbreitet, für die Bemessung von Brücken selbst in der Entwurfsphase numerische Berechnungsverfahren wie die Finite Elemente Methode (FEM) zu verwenden. Konsequenterweise sollte das FEM-Modell nicht nur verwendet werden, um Spannungen und Verformungen zu berechnen, sondern auch die Eigenfrequenzen. So können dynamische Berechnungen vorab ohne zusätzlichen Aufwand durchgeführt werden.

Als erste Annäherung sollte das Berechnungsmodell so einfach wie möglich gehalten werden. Dazu wird die Brücke durch Balken- und Seilelemente sowie Federn dreidimensional abgebildet. Das FEM-Modell sollte vertikale, horizontale und Torsionsschwingungen abbilden können. So kann ein grober Überblick über Eigenfrequenzen und die zugehörigen Schwingungsformen gewonnen werden und Schwingungsprobleme identifiziert werden. Mit zunehmender Komplexität des Tragwerkes nimmt die Anzahl der Eigenformen zu und es werden mehr Elemente benötigt. In einem feineren FEM-Modell können zusätzliche Elementtypen wie Platten oder Schalen zur Anwendung kommen. Um zuverlässige Ergebnisse für Eigenfrequenzen zu erhalten, ist es wichtig, Lagerungsbedingung, Bodensteifigkeit, die Struktursteifigkeit und die Masseverteilung realistisch abzubilden. Alle Gewichtsanteile, Ausbaulasten und Seilverspannungen müssen bei der Berechnung der Eigenfrequenzen berücksichtigt werden. Ausbaulasten aus Möblierung, Belag und Geländer sollten als zusätzliche Masse so genau wie möglich erfasst werden. Die Verwendung von Einzelmassen, die keine Masseträgheit für die Rotationsfreiheitsgrade besitzt, ist in der Regel ausreichend. Für die Abbildung von Lagerungen und Gründungen sollten die dynamischen Bodenkennwerte verwendet werden, da die Ergebnisse sonst sehr ungenau sind.

Es wird empfohlen bei der Planung von Dämpfern, in jedem Fall die erste und weitere Eigenfrequenzen der Brücke durch Messung zu bestimmen, um erforderliche Dämpfereigenschaften zu bestimmen.

Von jeder Eigenform sollte die modale Masse bekannt sein, wenn das SDOF-Verfahren (siehe Abschnitt 4.5.1.2) verwendet wird.

Die Untersuchung einiger ausgewählten Fußgängerbrücken hat gezeigt, dass gerade bei leichten Brücken die zusätzliche Masse der Fußgänger einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenfrequenz der Brücke hat. Bei Einzelpersonen und Personengruppen ist dieser Einfluss vernachlässigbar; bei Personenströmen aber sinkt die Eigenfrequenz deutlich. Maßgeblich für diesen Effekt ist das Verhältnis zwischen Masse des Brückendecks und Fußgängermasse und er nimmt mit abnehmender Masse des Brückendecks zu.

Eigenfrequenzen einer Brücke können in einen kritischen Frequenzbereich (siehe Abschnitt 4.2) fallen, in dem die Schwingungsanregung durch Fußgänger stattfindet. Zusätzliche Massen aus ständiger Last oder Verkehr verschieben die Eigenfrequenzen, so dass sie den kritischen Bereich verlassen oder auch in ihn hineinkommen. Die Grenzfrequenzen, die den kritischen Frequenzbereich markieren, sollten nicht als starre Werte aufgefasst werden; sie identifizieren eher Übergangsbereiche.

Die Zunahme der modalen Masse durch Fußgänger kann 50 % gegenüber der unbeladenen Brücke betragen.

Dieser Einfluss der statischen Fußgängermasse kann einfach ermittelt werden – die modale Masse m^* unter Berücksichtigung der Fußgänger beträgt:

$$m^* = \int_{L_D} \mu_D \; \rho \; (\Phi\Phi \;\; (x))^2 \, dx \qquad \text{Eq. 4-1}$$

Dabei ist

μ_D die Masse des Brückendecks in kg/m,

$\rho = \frac{\mu_D + \mu_P}{\mu_D}$ der Einflussfaktor zur Berücksichtigung der zusätzlichen Fußgängermasse,

μ_P die längenbezogene Fußgängermasse in kg/m,

$\Phi(x)$ die Schwingungsform.

Zur Identifizierung eines Grenzwertes ab dem die Fußgängermasse berücksichtigt werden sollten, kann die nachstehende Gleichung 4-2 verwendet werden. Sie zeigt, dass ein Anstieg der modalen Masse um 5 % zu einer Verringerung der Eigenfrequenz von 2,5 % führt.

$$f'(\rho = 1{,}05) = \sqrt{\frac{k^*}{\rho m^*}} = \sqrt{\frac{k^*}{1{,}05 m^*}} = 0{,}976 f \qquad \text{Eq. 4-2}$$

Diese Änderung liegt innerhalb des Genauigkeitsbereiches, mit dem Eigenfrequenzen ermittelt werden können. Daher kann die Fußgängermasse, wenn sie nicht mehr als 5 % der Masse des Berückendecks beträgt vernachlässigt werden.

4.2 Schritt 2: Überprüfung, ob kritische Eigenfrequenzen vorliegen

Wenn Eigenfrequenzen f_i einer Brücke im kritischen Frequenzbereich liegen, kann die Brücke als anfällig gegenüber fußgängerinduzierten Schwingungen betrachtet werden, so das eine dynamische Untersuchung angebracht ist. Der kritische Frequenzbereich wurde aus empirischen Untersuchungen zu den Schrittfrequenzen f_s abgeleitet. Den Bemessungsprinzipien der Eurocodes folgend wurden die charakteristischen Grenzwerte anhand des 5 %-Fraktilwertes für langsames Gehen als Untergrenze $f_{s,5\%}$ und des 95 %-Fraktilwertes für schnelles Gehen $f_{s,95\%,\mathrm{fast}}$ festgelegt.

Als Untergrenze für seitliche Schwingungen wird 0,5 Hz empfohlen, weil diese Frequenz bei der Eröffnung der Millenniums Bridge festgestellt wurde.

4.3 Schritt 3: Bestimmung der Bemessungssituation

Es wird dringend empfohlen im Hinblick auf Schwingungen Komfortanforderungen und erwartete Verkehrssituationen auf der Brücke mit dem Kunden (Brückenbetreiber) zu besprechen. Nur so ist es möglich Komfortgrenzen und Randbedingungen für die Bemessung realistisch festzulegen. In einem konstruktiven Dialog können Punkte wie die erwarteten Schwingungen, Komforteigenschaften und der mögliche Gebrauch von Dämpfern vorab beschrieben und geklärt werden (siehe Abschnitt 6).

Nachfolgend werden einige Belastungssituationen aufgelistet, wie sie das Zuverlässigkeitskonzept der Eurocodes [5] entsprechend bestimmter Auftretenshäufigkeiten für Gebrauchstauglichkeitszustände vorsieht. Diese Bemessungssituationen sind auch auf Fußgängerbrücken anwendbar:

- Ständige Bemessungssituationen beschreiben die Situationen, die dauerhaft auftreten,

- Häufige Bemessungssituationen beschreiben vorübergehende Situationen,
- Außergewöhnliche Bemessungssituationen beschreiben z.B. Unfälle.

Bemessungssituationen wie zum Beispiel bei der Brückeneinweihung treten oft nur einmal in der Lebensdauer der Brücke auf, andere Situationen wie die Benutzung durch Berufspendler dagegen täglich.

Zur realistischen Berechnung des Fußgängerkomforts sollten die Verkehrsklassen aus Abschnitt 4.3.1 verwendet werden. Wie schon erwähnt ist die Brückenbelastung während der Einweihung in der Regel sehr hoch und damit bemessungsbestimmend, obwohl sie nur einmal in der Lebensdauer der Brücke vorkommt. Es muss nun festgelegt werden, welche Komfortanforderungen (siehe Abschnitt 4.3.2) bei solchen seltenen Bemessungssituationen, und welche Komfortanforderung bei der häufigen Nutzung zu erfüllen sind.

4.3.1 Schritt 3a: Bestimmung der Verkehrsklasse

Die Art des Fußgängerverkehrs und die Personendichte bestimmen wesentlich das dynamische Verhalten von Fußgängerbrücken. Daher lohnt es sich zu unterscheiden, ob eine Brücke einsam liegt und nur geringer Verkehr stattfindet oder ob eine Brücke in der Stadtmitte liegt und einem dichten Pendlerverkehr ausgesetzt ist.

Gruppenformationen, Prozessionen oder Marschieren werden hier durch die angegebenen Verkehrsklassen nicht behandelt. Für diesen Fall sind gesonderte Untersuchungen erforderlich. Der Unterschied zwischen den Verkehrsklassen und den oben erwähnten Formationen von Fußgängern besteht darin, dass in den Verkehrsklassen eine individuelle Wahl der Schrittfrequenz durch die einzelnen Fußgänger stattfindet, während die Formationen oft durch Musik geschützt synchronisiert bzw. im Gleichschritt die Brücke passieren.

4.3.2 Schritt 3b: Bestimmung der Komfortklasse

Für die Bewertung des Schwingungskomforts werden üblicherweise Grenzbeschleunigungen vorgegeben. In Normen und Veröffentlichungen werden Grenzwerte angegeben die aus verschiedenen Gründen unterschiedlich sind. Dennoch liegen sie alle in einer bestimmten Bandbreite.

Generell ist die persönliche Wahrnehmung und Bewertung von Schwingungen ein subjektiver Prozess, der individuell unterschiedlich ist. So können zum Beispiel die Nutzer einer Brücke, die nahe an einem Altenheim oder Krankenhaus liegt, empfindlicher auf Schwingungen reagieren als die Nutzer einer Brücke, die auf einem Wanderweg liegt.

Ebenfalls kann die äußere Erscheinung einer Brücke die Bewertung der Schwingungen durch den Fußgänger beeinflussen. Bild 4-1 zeigt die Bandbreite der subjektiven Wahrnehmung von Schwingungen durch Fußgänger am Beispiel zweier Brücken, die sehr ähnliche dynamische Eigenschaften besitzen. Bei der stabiler wirkenden Wachtelstegbrücke in Pforzheim, rechtes Bild, empfinden viermal mehr Personen die Schwingungen als störend, als bei dem im linken Bild abgebildeten Kochenhofsteg in Stuttgart. Gleiches gilt für die Bewertung, dass die Schwingung als aufregend oder unterhaltsam bewertet wird. Hier liegt der Faktor etwa bei 3.

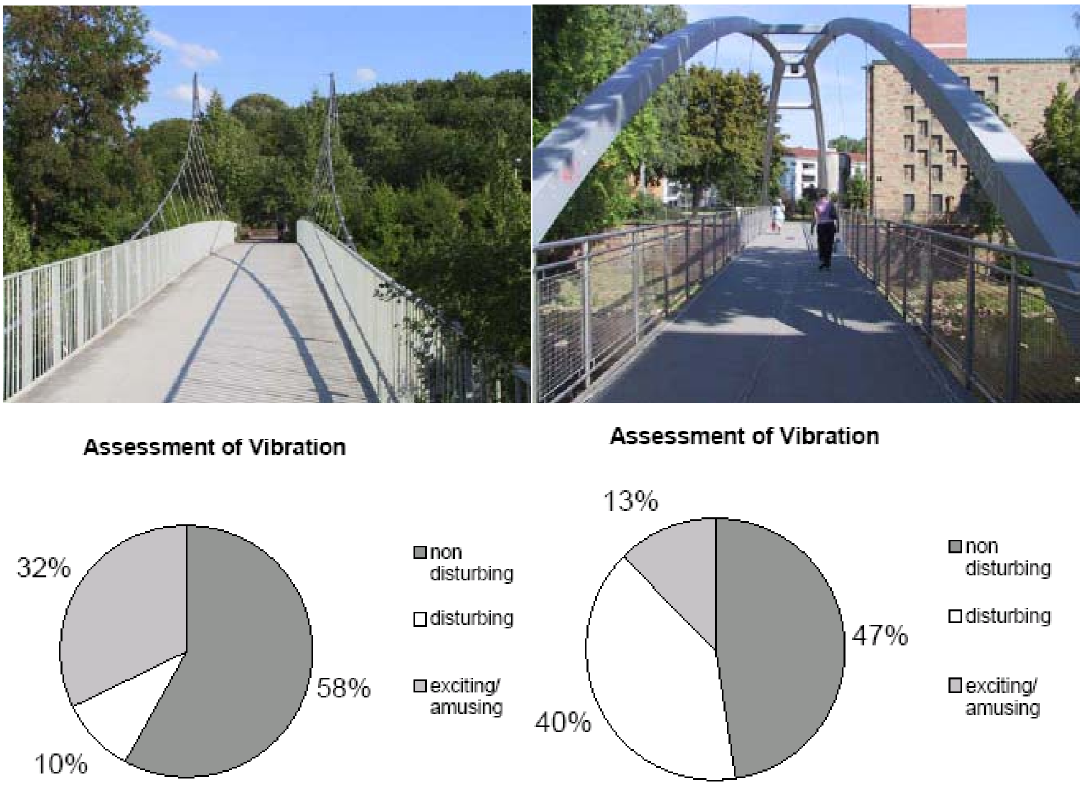


Bild 4-1: Vergleich der Schwingungsbewertung zweier Brücken

Die Bewertung von Brückenschwingungen unterliegt also einer ganzen Reihe „weicher" Kriterien:

- Anzahl der Personen auf der Brücke,
- Nutzungshäufigkeit,
- Höhe über Grund,
- Körperhaltung (sitzen, stehen, gehen),
- Harmonisch oder zeitlich begrenzter Erregung (Schwingungsfrequenz),
- Dauer der Einwirkung,
- Transparenz des Brückenbelags und des Geländers,
- Erwartungshaltung gegenüber Schwingungen, bedingt durch die äußere Brückenerscheinung.

4.4 Schritt 4: Bestimmung der Dämpfung

4.4.1 Dämpfermodell

Üblicherweise wird bei Tragwerken ein lineares Dämpfungsmodell verwendet. Diese Annahme ist darin begründet, dass Tragwerke normalerweise eine geringe Dämpfung besitzen und im Gebrauchszustand nur geringe Spannungen auftreten. Eine weitere Annahme besteht darin, dass die Dämpfung gleichmäßig verteilt im Tragwerk auftritt. Unter diesen Annahmen kann die Dämpfung durch eine Matrix C beschrieben werden, die proportional zur Massenmatrix M und zur Steifigkeit K ist (Rayleigh-Dämpfung):

$$C = \alpha M + \beta K \qquad \text{Eq. 4-3}$$

Durch diesen Ansatz wird eine Entkopplung der dynamischen Gleichgewichtsbedingungen vorgenommen, so dass eine modale Überlagerung bei der Berechnung der dynamischen Effekte durch Fußgängerverkehr vorgenommen werden kann.

Zur Abbildung eines Systems mit N-Freiheitsgraden durch N Systeme mit einem Freiheitsgrad (Einmassenschwingen, siehe Abschnitt 4.5.1.2), sind N Dämpfungswerte ξ_n erforderlich. Jeder Dämpfungswert ξ_n gibt den Anteil der kritischen Dämpfung für die Mode n an und wird als Funktion der modalen Masse m_n* und der Eigenkreisfrequenz ω_n beschrieben:

$$\xi_n = C_n / 2\, m_n^*\, \omega_n \qquad \text{Eq. 4-4}$$

Diese Dämpfungswerte können in Abhängigkeit der Konstanten α und β wie folgt ermittelt werden:

$$\xi_n = \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha}{\omega_n} + \beta\omega_n\right) \qquad \text{Eq. 4-5}$$

Diese Beziehung zeigt, dass nur zwei Einhängewerte ω mit zugehörigem ξ erforderlich sind, um die gesamte Dämpfungsmatrix aufzustellen. Die Einhängewerte werden anhand von Erfahrungswerten festgelegt.

4.4.2 Dämpfungswerte für Gebrauchslasten

Vergleichbare Werte für die Dämpfung, wie sie in Tabelle 4-5 gegeben werden, werden auch in SETRA/AFGC [9], in Bachmann und Amman [10], in EN 1991 [11] und in EN 1995 [12] angegeben.

Zusammenfassungen von Dämpfungswerten in Abhängigkeit der Frequenz bzw. Brückenspannweite, wie sie im SYNPEX-Projekt [13] an verschiedene Brücken gemessen wurden, zeigen die Bild 4-2 und Bild 4-3. Ebenfalls sind in den Bildern Werte aus Veröffentlichungen enthalten. Neben der großen Streuung der Werte wird auch deutlich, dass es einige Stahlbrücken gibt, die im Frequenzbereich für Fußgängerinduzierte Schwingungen nur eine Dämpfung von 0,5 % aufweisen.

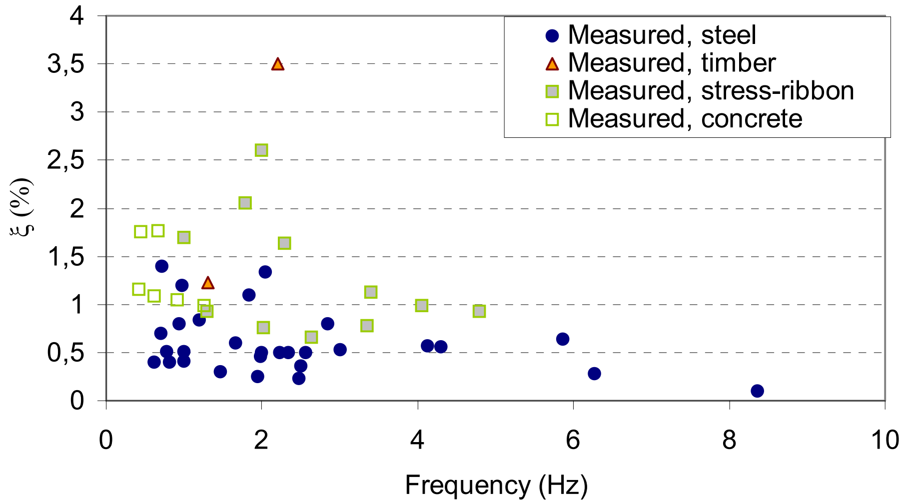


Bild 4-2: Im Gebrauchszustand gemessene Dämpfungswerte in Abhängigkeit der Eigenfrequenz

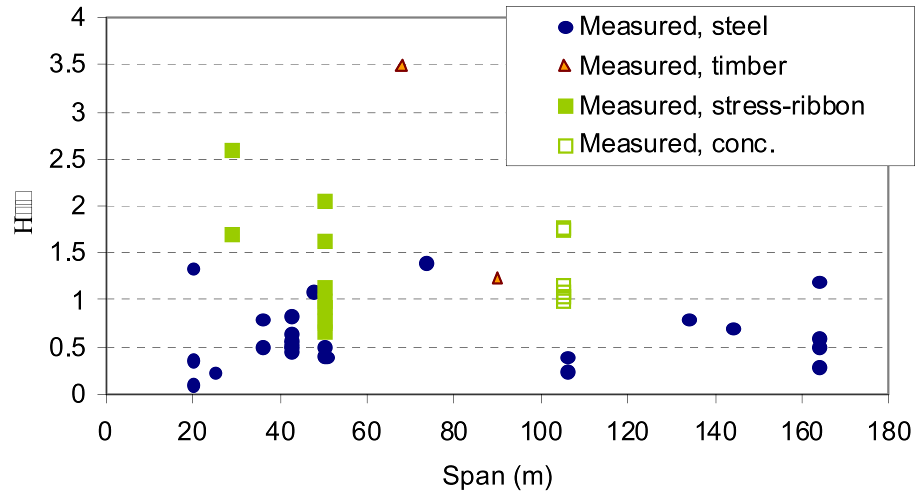


Bild 4-3: Im Gebrauchszustand gemessene Dämpfungswerte in Abhängigkeit der Brückenspannweite

4.4.3 Dämpfungswerte für große Amplituden

Für große Amplituden unter Erdbebeneinwirkung gibt EN 1998 [14] Bereiche für Dämpfungswerte an. Die Werte können auch hier für große Amplituden verwendet werden.

Tabelle 4-1: Dämpfungswerte bei großen Amplituden für verschiedene Baustoffe

Bauweise	Bereich des Dämpfungsgrads ξ
Beton	2,0 ÷ 7,0%
Stahl	1,0 ÷ 4,0%

4.5 Schritt 5: Bestimmung der Beschleunigung

Fußgängerbrücken werden in der Regel durch mehrere Fußgänger belastet. Die Gesamtbelastung ergibt allerdings nicht einfach aus der Summe der Einzellasten sondern es handelt sich um eine stochastische Einwirkung. In Abhängigkeit der Personendichte synchronisieren die Personen mehr oder weniger untereinander und passen ihre Gehweise möglicherweise an die Bewegung der Brücke an.

Die Belastung ist von der Personendichte, der individuellen Schrittfrequenz, dem Laufweg, der gegenseitigen Synchronisierung der Fußgänger, ihrem Gewicht usw. abhängig. Die Brückenreaktion wird neben der Belastung durch Tragwerkseigenschaften wie (modale) Masse, Eigenfrequenz und Dämpfung bestimmt. Diese Tragwerkseigenschaften unterliegen einer gewissen Streuung, die auch zu einer Streuung der dynamischen Bauwerksantwort führt.

Für die Bestimmung der Beschleunigung als Bauwerksantwort gibt es viele Verfahren, von denen hier einige empfohlen und in den nachfolgenden Abschnitt vorgestellt werden.

4.5.1 Modell mit harmonischer Anregung

4.5.1.1 Äquivalente Fußgängerzahl zur Berechnung von Fußgängerströmen

Einführung

Das Verfahren zur Bestimmung der äquivalenten Anzahl von Fußgängern arbeitet auf der Grundlage der modalen Analyse. Die Systemantwort kann also an einem gedämpften Einmassenschwinger unter harmonischer Belastung (F_0 sin (2 πf_0 t)) berechnet werden:

$$x(t) = \frac{F_0 / 4\pi^2 M}{\sqrt{(f^2 - f_0^2)^2 + 4\,\xi^2 f^2 f_0^2}} \sin(2\pi f_0 t - \varphi) \qquad \text{Eq. 4-6}$$

Dabei ist:

F_0 die Lastamplitude,

M die Systemmasse,

f die Systemeigenfrequenz,

f_0 die Lastfrequenz,

ξ die Systemdämpfung,

$\phi = arctan\left(\frac{2\xi f f_0}{f^2 - f_0^2}\right)$ die Phasenverschiebung.

Modale Analyse

Ein Balken kann durch ein System mit N Freiheitsgraden, wie beispielhaft in Bild 4-4 dargestellt, modelliert werden, wobei die Beanspruchung des Balken als Einzellast auf die Knoten aufgebracht wird. Bei einer modalen Analyse werden dann die einzelnen Knotenverformungen durch die Überlagerung der Verschiebungen repräsentativer Einzelknoten berechnet:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{r} x_i(t)\Phi_i \quad , \ r \leq N \qquad \text{Eq. 4-7}$$

Dabei ist:

$y(t)$ der Vektor der Verschiebungen der Einzelmassen (konzentriert am Knoten),

Φ_i sind die Verschiebungsvektoren der betrachteten modalen Verschiebungen i,

$x_i(t)$ sind die Systemantworten jedes Knotens der betrachteten Mode i.

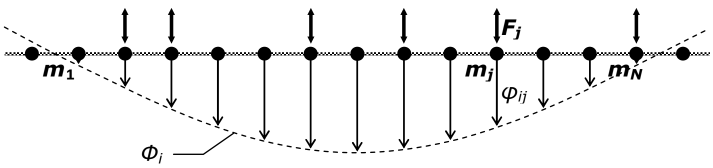


Bild 4-4: $n \leq N$ harmonische Einzellasten

Wenn alle Lasten in der gleichen Frequenz, $f_0 \neq f_i$, auftreten, dann kann die Systemantwort in einer bestimmten Schwingungsmode, z.B. Mode i mit den modalen Verformungen φ_{ij}, (siehe Bild 4-4) mit nachstehender Gleichung berechnet werden:

$$x_i(t) = \frac{\Phi_i^T F_0 / 4\pi^2 m^*_i}{\sqrt{\left(f_i^2 - f_0^2\right)^2 + 4\xi_i^2 f_i^2 f_0^2}} sin\left(2\pi f_0 t - \varphi_i\right) \qquad \text{Eq. 4-8}$$

Dabei ist:

$\Phi_i^T = \{\varphi_{i1}, \varphi_{i2}, \ldots \varphi_{ij}, \ldots \varphi_{iN}\}$ der Vektor der modalen Verformungen,

F_0 der Vektor der Lastamplituden ($F_0^T = \{F_1, F_2, \ldots F_j, \ldots F_N\}$),

$m^*_i = \sum_{j=1}^{N} m_j \varphi_{ij}^2$ die modale Masse,

f_i die Eigenfrequenz der Mode i,

f_0 die Frequenz der Belastung

ξ_i die Dämpfung in Mode i ,

φ_i die Phasenverschiebung in Mode i.

Systemantwort auf eine harmonisch schwingende Streckenlast – deterministischer Ansatz

In der Regel wird eine harmonisch schwingende Streckenlast durch $n = N$ Einzellasten ($Q_j \sin(2\pi f_{0j}\, t - \psi_j)$), abgebildet. Dabei sind die Knoten gleichmäßig angeordnet und die Lasten werden entsprechend der Schwingungsbäuche im Mode Φ_i, siehe Bild 4-5, angesetzt:

- Die Lastamplituden werden bezeichnet mit Q_j, j = 1 to n;
- Jeder Punkt besitzt eine Frequenz f_{0j}, j = 1 to n;
- An jedem Punkt existiert eine Phasenverschiebung ψ_j, j = 1 to n.

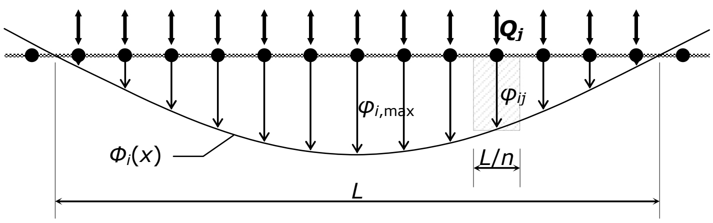


Bild 4-5: *n* = *N* harmonische Einzellasten

Bei einer belasteten Gesamtlänge L befindet sich jeder Knoten im Abschnitt $\left[\frac{j-1}{n}L, \frac{j}{n}L\right]$, siehe Bild 4-5). Der Rang der Mode und der Umstand, dass es sich um eine Streckenlast handelt wird wie folgt berücksichtigt:

$$\Phi_i^T F_0 = \sum_{j=1}^{N} \frac{\alpha_{nij}}{L} Q_j \text{ ,}$$

mit $$\alpha_{nij} = n \int_{(j-1)L/n}^{jL/n} \Phi_i(x)\,dx \text{ .}$$

Die Systemantwort wird durch die Überlagerung von Antworten auf einzelne Knoten bestimmt:

$$y_{i,max}(t) = \sum_{j=1}^{n} \frac{\left(\frac{\alpha_{nij}}{L} Q_j \sin\left(2\pi f_{0j}\, t - \varphi_{ij}\right) / 4\pi^2 m^*_i \right) \varphi_{i,max}}{\sqrt{\left(f_i^2 - f_{0j}^2\right)^2 + 4\,\xi_i^2 f_i^2 f_{0j}^2}} \text{ ,}$$

Dabei trägt die Phasenverschiebung für Mode i bei einer Einzellast am Knoten j:

$$\phi_{ij} = \arctan\left(\frac{2\,\xi_i f_i f_{0j} \cos\psi_j + \left(f_i^2 - f_{0j}^2\right)\sin\psi_j}{\left(f_i^2 - f_{0j}^2\right)\cos\psi_j - 2\,\xi_i f_i f_{0j} \sin\psi_j} \right) \text{.}$$

Unter der Annahme, dass alle Knoten die gleiche Lastamplitude erfahren und nicht in Phase sind ($Q_j = Q \sin \psi_j$) ergibt sich die Systemantwort zu::

$$y_{i,max}(t) = Q \sum_{j=1}^{n} \frac{\left(\alpha_{nij}\, \varphi_{i,max} / 4\pi^2 m^*_i\, L\right) \sin\left(2\pi f_{0j}\, t - \varphi_{ij}\right)}{\sqrt{\left(f_i^2 - f_{0j}^2\right)^2 + 4\xi_i^2 f_i^2 f_{0j}^2}} \qquad \text{Eq. 4-9}$$

Systemantwort auf eine harmonisch schwingende Streckenlast – Probabilistischer Ansatz

Mit dem oben beschriebenen Verfahren kann die Systemantwort auf einen Fußgängerstrom bestehend aus $n = N$ "zufälligen" Fußgängern berechnet werden. Zum oben angegebenen Fall bestehen die folgenden Unterschiede:

- Jede Einzellast besitzt eine eigene zufällige Frequenz f_{sj}, die normalverteilt ist $N\,[f_{s1}, \sigma]$;
- Jede Einzellast hat eine eigene Phasenverschiebung ψ_j die ebenfalls normalverteilt ist $U\,[0, 2\pi]$;
- Die Systemantwort (e.g. 4-9) wird hier ebenfalls als zufällige Größe betrachtet, weil sie von f_{sj} und ψ_j abhängig ist. Daher können ihr Mittelwert und ihre Standardabweichung ermittelt werden.

Es werden die folgenden Bezeichnungen verwendet:

- $\lambda_i = f_i / f_{s1}$ ist das Verhältnis der Eigenfrequenz in Mode *i* zum Mittelwert der Frequenz der Lasten,
- $\mu = \sigma / f_{s1}$: Variationskoeffizient der Lastfrequenzen,
- *fsj = fs1 (1 + μ uj):* zufällige Frequenz der Einzellast an Knoten j, wobei u_j eine normalverteilte Zufallsvariable ist.

Wenn anstelle von Verschiebungen Beschleunigungen bestimmt werden sollen, dann muss Gleichung (eq. 4-9) mit folgenden Thesen multipliziert werden:

$$\left(2\pi f_{sj}\right)^2 = \left(2\pi\right)^2 f_{s1}^2 \left(1 + \mu u_j\right)^2 .$$

Der Maximalwert der Beschleunigung ergibt sich dann zu:

$$\ddot{Z}_i = \max_t\left[\ddot{y}_{i,max}(t)\right] = \left(2\pi\right)^2 f_{s1}^2 \frac{Q}{f_{s1}^2} \times$$

$$\underbrace{\times \max_t \left[\sum_{j=1}^{n} \sqrt{\frac{\left(\alpha_{nij}\, \varphi_{i,max} / 4\pi^2 m^*_i\, L\right)^2 \left(1 + \mu u_j\right)^4}{\left(\lambda_i^2 - 1 - 2\mu u_j - \mu^2 u_j^2\right)^2 + 4\xi_i^2 \lambda_i^2 \left(1 + 2\mu u_j + \mu^2 u_j^2\right)}} \times \atop \times \sin\left(2\pi f_{sj}\, t - \varphi_{ij}\right) \right]}_{z_i},$$

Dabei wird die Phasenverschiebung zwischen Mode *i* und der Einzellast an Knoten *j* berechnet mit:

$$\varphi_{ij} = \arctan\left(\frac{2\xi_i \lambda_i \left(1 + \mu u_j\right) \cos\psi_j + \left(\lambda_i^2 - \left(1 + \mu u_j\right)^2\right) \sin\psi_j}{\left(\lambda_i^2 - \left(1 + \mu u_j\right)^2\right) \cos\psi_j - 2\xi_i \lambda_i \left(1 + \mu u_j\right) \sin\psi_j} \right) =$$

$$= \arctan\left(\frac{2\xi_i \lambda_i \left(1 + \mu u_j\right)}{\left(\lambda_i^2 - \left(1 + \mu u_j\right)^2\right)} \right) + \psi_j ,$$

Ebenso gilt:

$$\ddot{Z}_i = (2\pi)^2\, Q\, z_i \qquad \text{Eq. 4-10}$$

Anmerkung: Im Falle von λ_i = 1, μ = 0 und ψ_j = 0 (Deterministisch bestimmte Resonanzfall) gilt:

$$\ddot{Z}_i = (2\pi)^2 f_{s1}^2 \frac{Q}{f_{s1}^2} \times \underbrace{\max_t \left[\sum_{j=1}^{n} \frac{\alpha_{Nij}\, \varphi_{i,max} / 4\pi^2 m^*_i\, L}{2\,\xi_i} \sin\left(2\pi f_{sj}\, t - \frac{\pi}{2}\right) \right]}_{z_i'} = (2\pi)^2\, Q\, z_i' \qquad \text{Eq. 4-11}$$

Bestimmung der äquivalenten Fußgängerzahl

Die Äquivalente eines Fußgängerstroms bezeichnet die Anzahl von Fußgängern, deren Schrittfrequenz mit der Eigenfrequenz im Mode i zusammenfällt und ohne Phasenverschiebung die gleiche Systemantwort verursachen wie ein Fußgängerstrom. Sie kann durch Bestimmung der maximalen Beschleunigung für die folgenden beiden Fälle bestimmt werden (siehe auch Bild 4-6):

Zufälliger Strom mit n = N Fußgängern (eq. 4-10): $\ddot{Z}_i = (2\pi)^2\, Q\, z_i$

Äquivalenter Strom mit $n' \leq n$ Fußgängern (eq. 4-11): $\ddot{Z}_{i,eq} = (2\pi)^2\, Q\, z_i' \dfrac{n'}{n}$

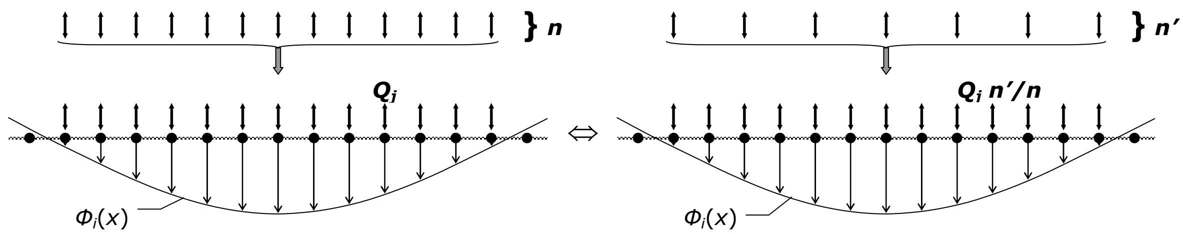


Bild 4-6: Äquivalenz der Fußgängerströme

Es gilt: $\ddot{Z}_i = \ddot{Z}_{i,eq} \;\Rightarrow\; z_i = z_i' \dfrac{n'}{n} \;\Rightarrow\; n' = \dfrac{z_i}{z_i'}\, n$

Nach dem in [9] vorgeschlagenen Ansatz beträgt,

$$n' = k_{eq} \sqrt{n\, \xi_i}\ , \qquad \text{Eq. 4-12}$$

Wobei der Koeffizient k_{eq} wie folgt bestimmt wird:

$$k_{eq} = \frac{n'}{\sqrt{n\, \xi_i}} = \frac{z_i}{z_i'} \sqrt{\frac{n}{\xi_i}} \qquad \text{Eq. 4-13}$$

In Gleichung 4-13 ist z_i die zufällige Größe. Der Mittelwert $E(z_i)$ und die Standardabweichung $\sigma(z_i)$ können durch Berechnung Variation der Parameter erfolgen: :

$$z_i = \max_t \left(\sum_{j=1}^{n} \sqrt{\frac{\left(\alpha_{Nij}\, \varphi_{i,max} / 4\pi^2 m^*_i\, L\right)^2 \left(1 + \mu\, u_j\right)^4}{\left(\lambda_i^2 - 1 - 2\,\mu\, u_j - \mu^2 u_j^2\right)^2 + 4\,\xi_i^2\, \lambda_i^2 \left(1 + 2\,\mu\, u_j + \mu^2 u_j^2\right)}} \times \sin\left(2\pi f_{sj}\, t - \varphi_{ij}\right) \right) \qquad \text{Eq. 4-14}$$

Ergebnisse

Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulation wurden Sensitivitätsanalysen an einer Sinus-Halbwelle der Mode Φ_i, siehe Bild 4-6 durchgeführt, um die Streuung von Fußgängerlasten abzubilden. In diesen Untersuchungen wurden die folgenden Parameter variiert:

- die Dämpfung , ξ_i
- das Frequenzverhältnis, λ_i
- der Variationskoeffizient, μ
- die Fußgängeranzahl, *n.*

In einem ersten Schritt wurden Maxima von z_i (Gleichung 4-14) anhand von 2500 Berechnungen für jeden Parametersatz durchgeführt. In jeder Berechnung wurden *n* Zufallswerte der standard-normal verteilten Größen u_j und der Phasenverschiebung ψ_j. verwendet. Daraufhin wurde der Koeffizient k_{eq} mit den oben beschriebenen Gleichung berechnet. Exemplarisch zeigt Bild 4-7 ein Histogramm für k_{eq} , von dem schließlich die 5 %- und die 95 %-Fraktilwerte entnommen werden.

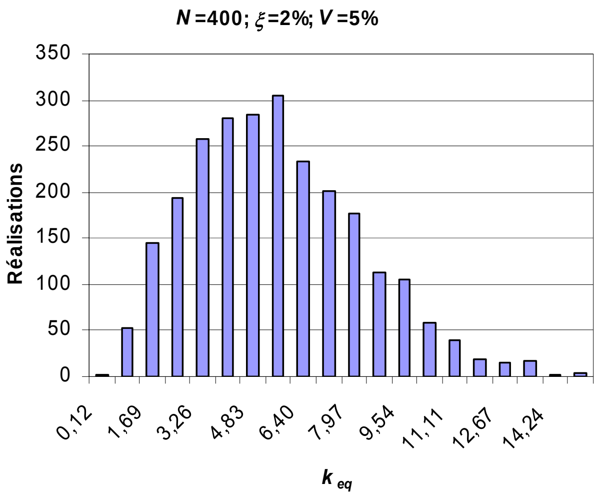


Bild 4-7: Beispiel für ein berechnetes Histogramm

Mit den ermittelten k_{eq},-Werten kann die äquivalente Anzahl von Fußgängern *n′* bestimmt werden. Die Ausdrücke zur Berechnung von *n′* wurden durch Regressionsanalysen bei Variation der Dämpfung und der Anzahl der Fußgänger auf der Brücke ermittelt.

4.5.1.2 Anwendung von Lastmodellen

Keine weitergehende Hintergrundinformation zum Leitfaden erforderlich.

4.5.1.3 Einmassenschwinger (SDOF-Verfahren)

Zur Darstellung der Berechnung mit Hilfe eines Einmassenschwingers (single degree of freedom - SDOF) wird hier ein Einfeldträger verwendet. Der Träger besitzt eine verteilte Masse μ [kg/m], eine Steifigkeit *k* und die Länge *L*. Die Belastung ist eine über die Trägerlänge konstante Streckenlast $p(x)\ \sin(\omega\ t)$.

Es wird angenommen, dass die Schwingungsform $\Phi(x)$ der Biegemode durch eine halbe Sinuswelle $\Phi(x) = \sin(m \times x/L \times \pi)$ abgebildet werden kann, wobei m die Anzahl der Halbwellen bezeichnet.

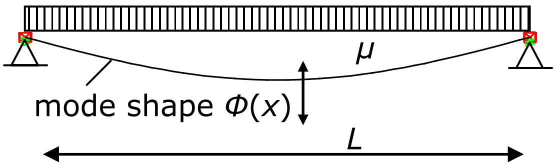


Bild 4-8: Einfeldträger mit Schwingungsform $\Phi(x)$, $m=1$

Die modale (generalisierte) Masse m^* und die modale (generalisierte) Belastung $p^* \sin(\omega\, t)$ werden wie folgt berechnet:

$$m^* = \int_{L_D} \mu \cdot (\Phi(x))^2\, dx \qquad \text{Eq. 4-15}$$

$$p^* \sin(\omega t) = \int_{L_D} p(x)\Phi(x)\, dx \cdot \sin(\omega t) \qquad \text{Eq. 4-16}$$

Für Einfeldträger gibt Tabelle 4-2 geschlossene Lösungen für die generalisierte Masse m^* und die generalisierte Belastung $p^* \sin(\omega\, t)$ an. Ebenso gibt Tabelle 4-2 die generalisierte Last für eine Einzellast $P_{mov}^* \sin(\omega\, t)$ an, die sich über die Brücke mit der Geschwindigkeit v bewegt. Diese Art von Belastung ist zeitlich auf das durchschreiten einer Halbwelle begrenzt.

Tabelle 4-2: Generalisierte (modale) Masse und generalisierte Belastung

Schwinungsform	Generalisierte Masse	Generalisierte Belastung p^* für die Streckenlast $p(x)$	Generalisierte Belastung p^* für die Wanderlast P_{mov}	Zeitdauer
	m^*	p^*	p^*	t_{max}
$m=1$: $\varphi(x) = \sin\left(\frac{x}{L}\pi\right)$	$\frac{1}{2}\mu L$	$\frac{2}{\pi} p(x) L$	$\frac{2}{\pi} P_{mov}$	L/v
$m=2$: $\varphi(x) = \sin\left(\frac{2x}{L}\pi\right)$	$\frac{1}{2}\mu L$	$\frac{1}{\pi} p(x) L$	$\frac{2}{\pi} P_{mov}$	$L/(2v)$
$m=3$: $\varphi(x) = \sin\left(\frac{3x}{L}\pi\right)$	$\frac{1}{2}\mu L$	$\frac{2}{3\pi} p(x) L$	$\frac{2}{\pi} P_{mov}$	$L/(3v)$

Dabei ist :

P_{mov} [kN]:	Wanderlast	L [m]:	Länge
$p(x)$ [kN/m]:	Streckenlast	m [-]:	Anzahl der Halbwelle
μ [kg/m]:	Massebelegung	v [m/s]:	Geschwindigkeit der Wanderlast

Die zweite Schwingungsform eines Einfeldträgers weist zwei Halbwellen auf (m = 2). Wenn eine durchlaufende Gleichstreckenlast über die gesamte Trägerlänge auf gebracht würde, dann würde sich die generalisierte Belastung p^* zu Null ergeben, weil sie zu gleichen Teilen mit und gegen die Verformung gerichtet wäre. Die in der Tabelle angegebenen generalisierten Belastungen gelten daher für die Annahme, dass die Last jeweils in Richtung der Verformung wirkt. Diese Annahme führt zu größeren Verformungen. Es ist anzumerken, dass dieser Lastansatz von anderen Bemessungsempfehlungen abweichen kann. Andere Ansätze sehen vor, dass die belastete Fläche von der üblicherweise berücksichtigten Schwingungsform abhängt [32] oder die gesamte belastbare Fläche zu berücksichtigen ist [9].

4.5.2 Antwortspektrumverfahren für Fußgängerströme

Das allgemeine Verfahren der Antwortspektren ist aus dem Windingenieurwesen bekannt, wo es verwendet wird, um den Effekt von Windböen auf nachgiebige Bauwerke zu bestimmen. Wie die Windeinwirkung handelt es sich bei den Fußgängerlasten um stochastische Beanspruchungen. Und weil es nicht möglich ist, die Tragwerkseigenschaften wie z.B. die Eigenfrequenzen ohne Unsicherheiten zu bestimmen, können diese ebenfalls als stochastische Größen aufgefasst werden.

Als Bemessungswert wurde die Systemantwort "Spitzenwert der Beschleunigung" gewählt. Im Bemessungsnachweis wird diese maximale Beschleunigung mit der akzeptablen Beschleunigung entsprechend der Komfortklasse verglichen.

Der Maximalwert der Beschleunigung wird als Produkt eines Spitzenfaktors $k_{a,d}$ und einer Standardabweichung σ_a der Beschleunigung ermittelt:

$$a_{max,d} = k_{a,d}\ \sigma_a$$

Beide Faktoren wurden durch Monte-Carlo-Simulationen, in denen eine Vielzahl von Fußgängerströmen auf einer Vielzahl von Brückengeometrien durch Zeitschrittberechnungen simuliert wurden, bestimmt.

Die Standardabweichung der Beschleunigung ist das Ergebnis von Berechnungen mit stochastischen Lasten auf festgelegten Brückensystemen. Die Belastung wurde für unterschiedliche Brücken mit Spannweiten von 20 m bis 200 m, Brückenbreiten von 3 m und 5 m und unterschiedlichen Personenstromdichten (0,2 P/m², 0,5 P/m², 1,0 P/m² and 1,5 P/m²) berechnet. Für jeden Brückentyp und jede Personenstromdichte wurden 5000 verschiedene Personenströme in Zeitschrittberechnungen abgebildet. Dabei wurde für jeden einzelnen Fußgänger die folgenden Eigenschaften als Zufallsgröße entsprechend der jeweiligen Verteilungsfunktion generiert:

- Personengewicht (Mittelwert = 74,4 kg; Standardabweichung = 13 kg),
- Schrittfrequenz (Mittelwert und Standardabweichung sind von der Personenstromdichte abhängig),
- Faktor für seitliche Komponente der Schrittlast (Mittellast = 0,0378, Standardabweichung = 0,0144),
- Startposition eines jeden Fußgängers (Zufallswert)
- Zeitpunkt des Losgehens (Zufallswert).

Der Spitzenfaktor $k_{a,d}$ wird dazu verwendet, die charakteristische Systemantwort zu bestimmen. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird als charakteristischer Wert der 95 %-Fraktilwert $k_{a,95\%}$ verwendet, der ebenfalls ein Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation ist.

Ein weiteres Ergebnis der Simulationen, in denen die ersten 4 vertikalen und die ersten beiden seitlichen und Torsion-Moden ausgewertet wurden, ist das Risiko, dass der Lock-in Effekt auftritt.

Um den Lock-in Effekt zu identifizieren wurde eine Grenzamplitude der Beschleunigung von 0,1 m/s² festgelegt.

Demnach ist der folgende Frequenzbereich für das Auftreten des Lock-in Effektes maßgebend:

$$0{,}8 \leq \frac{f_i}{f_{s,m}/2} \leq 1{,}2\ Hz\ ,$$

Dabei ist: f_i die Eigenfrequenz der seitlichen Schwingung und

$f_{s,m}$ die Schrittfrequenz.

Die zu untersuchenden Eigenfrequenzen sollten mit der mittleren Schrittfrequenz von Personenströmen übereinstimmen.

4.6 Schritt 6: Überprüfung des seitlichen Lock-in

Bei Gehen bewegt sich der Schwerpunkt des Körpers nicht nur vertikal sondern auch seitlich. Diese seitliche Bewegung wird durch den wechselnden Bodenkontakt linkes Bein – rechtes Bein bestimmt und tritt in der halben Schrittfrequenz auf.

Es wurde bisher nicht beobachtet, dass Fußgängerströme mit vertikalen Brückenschwingungen synchronisierten. Das mag daran liegen, dass Beine und Gelenke einen Teil der vertikalen Schwingungen absorbieren und damit dämpfend wirken, so dass der Körperschwerpunkt von vertikalen Brückenschwingungen kaum beeinflusst wird. Im Allgemeinen wird die Synchronisierung von Fußgängern mit vertikalen Schwingungen nicht nachgewiesen. Aus Versuchen ist bekannt, dass Einzelpersonen vertikalen Beschleunigungen von 1,5 m/s^2 mit der Brücke synchronisieren können [7].

Im Gegensatz dazu reagieren Fußgänger viel sensibler auf seitliche Schwingungen. Wenn ein Fußgänger über eine seitlich schwingende Brücke geht, dann versucht er intuitiv, durch seitliche Bewegungen diese Schwingungen auszugleichen. Es wird angenommen, dass auch sehr kleine Schwingungen dieses intuitive Verhalten hervorrufen. Die Änderung des Gehverhaltens umfasst sowohl eine Anpassung der Schrittfrequenz als auch ein breitbeinigeres Gehen; dabei neigen die Personen dazu, die zweifache Schwingfrequenz zu übernehmen und ihren Schwerpunkt im Takt seitlich zu verlagern [2]. Das seitliche

Schwanken des Körpers in der Brückenfrequenz führt zu seitlichen Bodenkontaktkräften die in Resonanz aufgebracht werden und so den Energieeintrag erhöhen (Bild 4-9). Dies kann dazu führen, dass eine Brücke mit geringen seitlichen Verformungen durch die unbewusste Anpassung des Gehverhaltens bei geringerer Dämpfung zu großen Verformungen angeregt werden (Lock-in Effekt).

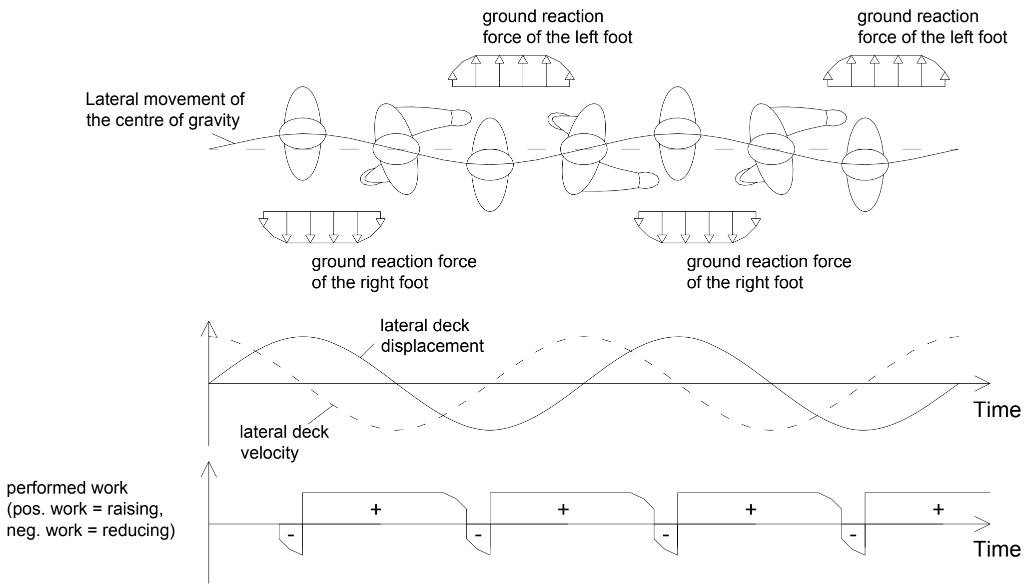


Bild 4-9: Schematische Beschreibung synchronisierten Gehens

In Versuchen auf einer Versuchsplattform, die innerhalb des Projekts SYNPEX [13] durchgeführt wurden, wurde festgestellt, dass Personen, die mit einer Schrittfrequenz von $f_i \pm 0{,}2$ Hz gehen, zum Synchronisieren neigen. Schneller gehende Personen werden durch seitliche Schwingungen kaum beeinflusst, sie gehen stabiler als langsame Personen.

Der Schwellwert für das Auftreten des Lock-in Effekts wird als Beschleunigung ausgedrückt. Eine Frequenzabhängigkeit konnte in Messungen nicht festgestellt werden. Messungen in einem Versuchsstand in Frankreich sowie auf der Solferino Brücke [6] haben gezeigt, dass der Schwellwert bei 0,1 bis 0,15 m/s^2 liegt:

$$a_{lock-in} = 0{,}1 \text{ to } 0{,}15 \text{ m/s}^2 \qquad \text{Eq. 4-17}$$

In Forschungsarbeiten [16], die sich mit der Milleniumsbrücke befassten, wurde eine andere Herangehensweise gewählt. Hier wird das Lock-in Phänomen als negative Dämpfung betrachtet, deren Größe von der Anzahl Personen N_L definiert, die in Abhängigkeit der Dämpfung ξ, der modalen Masse m^*, der Eigenfrequenz f und einer Konstanten k berechnet werden kann:

$$N_L = \frac{8\pi\xi m^* f}{k} \qquad \text{Eq. 4-18}$$

Auf der Grundlage von Messungen an der Milleniumsbrücke bestimmten Dallard et al. [16] die Konstante k für den Frequenzbereich 0,5-1,0 Hz zu 300 Ns/m.

Neuere Untersuchungen [17] an den Fußgängerbrücken Coimbra und Guarda, Portugal zeigen gute Übereinstimmungen des Lock-in Effektes mit der o.a. Milleniumsformel. Als Schwellenwert für die Beschleunigung wurde 0,15-0,2 m/s^2 festgestellt.

4.7 Schritt 7: Überprüfung des Komfortniveaus

Keine zusätzlichen Hintergrundinformationen zum Leitfaden.

5 Bewertung der dynamischen Eigenschaften von Fußgängerbrücken

5.1 Einführung

Obwohl umfangreiche Kenntnisse über Baustoffe und Belastung vorliegen und das Tragwerkverhalten dank neuester Berechnungsverfahren gut abgebildet kann, bleiben doch einige Unsicherheiten bei der Berechnung von Tragwerken. Daher kann das dynamische Verhalten eines Tragwerkes erst nach dessen Fertigstellung richtig bewertet werden. Die Tatsache gilt insbesondere für Fußgängerbrücken, die in einem schmalen Frequenzband angeregt werden, in die häufig auch die Brückeneigenfrequenzen fallen.

Standardmessungen, im Folgenden als **Level 2**-Messungen bezeichnet, sollten bei jeder schwingungsanfälligen Brücke nach ihrer Fertigstellung ausgeführt werden. Das Ergebnis solcher Messungen ist die Identifizierung kritischer Eigenfrequenzen, die Bestimmung der Dämpfung und die Messung der Antwort auf einzelne Fußgänger, Fußgängergruppen oder Fußgängerströme.

Level 1-Messungen, die zusätzlich die Identifikation von Schwingungsformen umfassen, sind bei Verwendung von Elementen zur Schwingungsbeeinflussung (z.B. Dämpfer) in jeden Fall erforderlich.

5.2 Messung der Grundschwingungen und Bestimmung der kritischen Eigenfrequenzen

5.2.1 Messung der Grundschwingungen und Bestimmung der Eigenfrequenzen

Im einfachsten Fall wird ein Messaufnehmer, üblicherweise ein Beschleunigungsaufnehmer, für die Messung von Schwingungen verwendet. Dabei kann wie folgt vorgegangen werden: in zwei Messreihen wird der Messaufnehmer an dem Messpunkt installiert, um die Grundschwingungen zu messen.

In der ersten Messreihe werden die Grundschwingungen der Brücke ohne Fußgängerbetrieb gemessen. Falls möglich sollte die Brücke dazu gesperrt werden, damit keine Frequenzanteile aus Fußgängern enthalten sind. Die Messaufnehmer müssen dafür entsprechend empfindlich sein; typische Spritzenbeschleunigungen liegen bei diesen Messungen im Bereich von 2-5 m*g*. Durch diese Messung werden die kritischen Eigenfrequenzen der vertikalen und/oder horizontalen Schwingungsmoden bestimmt.

Die zweite Messreihe sollte unter dem gegebenen Fußgängerbetrieb erfolgen. Dadurch ist eine bessere Charakterisierung der Brückenfrequenzen und auch ein Maß für die Schwingungsamplituden während des Brückenbetriebs möglich.

Bei der Wahl der Abtastrate sollte folgendes beachtet werden:

- Unter der Annahme, dass die Zielfrequenzen im Bereich von 0,1-20 Hz liegen, sollte eine Abtastrate von 50 Hz bis 100 Hz gewählt werden. Die Datenerfassung sollte digitale Filter besitzen, damit Alias-Fehler vermieden werden. Ansonsten sind höhere Abtastraten erforderlich;
- Entsprechend der geringsten zu erwartenden Frequenz f_{low} der Brücke sollen eine minimale Messdauer eingehalten werden, die mit folgender Formel berechnet werden kann:

  $$(A / f_{low})\ [n - (n\text{-}1)\ overl]\ [\mathrm{s}] \qquad \text{Eq. 5-1}$$

  Dabei ist A eine Konstante im Wertebereich von 30 bis 40, n ist die Anzahl der Datensätze, mit denen der Mittelwert der spektralen Leistungsdichte (PSD) bestimmt wird und *overl* ist der Grad der Überlappung, der bei dieser Bestimmung verwendet wird. Häufige Werte für n liegen im Bereich von 8-10 und eine übliche Überlappung beträgt 50 %. So ergibt sich z.B. bei einer Brücke mit einer kleinsten Eigenfrequenz von 0,5 Hz bei einer Mittlung über 10 Datensätze und einer Überlappung von 50 % die minimale Aufzeichnungsdauer zu 330-440 s. Es sollten also 33 000 bis 44 000 Datenwerte bei einer Abtastrate von 100 Hz aufgezeichnet werden und man erhält mittlere Leistungsschichten mit einer Frequenzauflösung von 0,017 Hz to 0,0125 Hz;
- Die gemessenen Zeitschritte sollen so aufbereitet werden, dass die mittleren spektralen Leistungsdichten (PSD) ermittelt werden können. Eine Möglichkeit diese PSD zu erhalten ist folgende: Teile den Zeitschrieb in n Datensätze und berücksichtige dabei die Überlappung; entferne in jedem Datensatz den Trend; verwende ein Zeitfenster (z.B. Hanning-Fenster); bestimme die normalisierte Leistungsdichte jedes Datensatzes; mittle die roh-PSDs;
- Die Auswertung des an einem oder mehreren Stellen gemessenen PSD erlaubt eine Identifikation der Eigenfreqenzen;
- Der Spitzenwert der Beschleunigung unter Fußgängerverkehr kann zum Vergleich mit den akzeptierten Beschleunigungsgrenzen verwendet werden.

5.2.2 Abschätzung der Dämpfung für kritische Eigenfrequenzen

Eine Näherung der Dämpfung kann durch den Algorithmus für Einmassenschwinger erhalten werden. Dabei wird für unterschiedliche Zeitintervalle die Abnahme der Schwingungsantwort bewertet (Gegebenenfalls sollte das Signal mit einem Bandpassfilter bearbeitet werden; vor allem wenn Frequenzen dicht beieinander liegen oder ein Rauschen festzustellen ist). So kann die Dämpfung graphisch über der Schwingungsamplitude aufgetragen werden, wobei als Amplitude der Mittelwert im Zeitintervall verwendet wird.

5.2.3 Messung der durch einen Fußgänger verursachen Schwingungen

Die Brückenschwingung infolge eines Fußgängers, der mit einer maßgebenden Schrittfrequenz die Brücke passiert, wird an den kritischen Stellen (s) gemessen. Wegen der Zufälligkeit der Brückenanregung sollten mehrere Messungen für jede

Kombination von Frequenz und Gangart durchgeführt werden, z.B. 5 je Kombination.

5.2.4 Messung der durch Fußgängergruppen verursachten Schwingungen

Üblicherweise beträgt bei Messungen mit Fußgängergruppen die Gruppengröße ca. 10 bis 20 Personen.

Bei den Messungen sollte so vorgegangen werden wie bei den Messungen von Einzelpersonen. D.h. 5 Messungen je Gangart/Frequenz (bei Brücken mit Längsneigung sollten beim Abwärtsgehen gemessen werden), die Messfrequenz sollte 50 Hz-100 Hz betragen, das Gewicht der Gruppenmitglieder sollte notiert werden und der höchste gemessene Spitzenwert ist maßgebend.

5.2.5 Messung der durch Fußgängerströme verursachten Schwingungen

Keine weitere Hintergrundinformation zum Leitfaden.

5.3 Bestimmung der dynamischen Brückeneigenschaften

Die Bestimmung der modalen Eigenschaften, das sind Eigenfrequenzen, Schwingungsform und Dämpfung, kann durch Messungen unter Zwangserregung, Messung freier Schwingungen und die Messung ambienter Schwingungen erfolgen.

5.3.1 Untersuchungen unter Zwangserregung

5.3.1.1 Anregung durch Hammerschlag

Selbst weiche Hammerschläge verursachen einen kurz andauernden Impuls (z.B. 10 ms auf einer Betonoberfläche), dessen Frequenzbereich bis 200 Hz liegen kann. Auch wenn analoge Filter bei der Datenerfassung oder Datenaufbereitung verwendet werden, kann eine spektrale Bewertung des Impulses nur erfolgen, wenn der Zeitschrieb entsprechend genau ist. Unter der Annahme, dass der Impuls durch eine halbe Sinuswelle beschrieben werden soll, sollten mindestens drei Punkte verwendet werden, um diese Welle mit einem Zeitschritt von 5 ms abzubilden. Daher sollte die Abtastfrequenz mindestens 200 Hz betragen, auch wenn die gesuchten Frequenzen im Bereich von 0,1 Hz bis 20 Hz liegen.

Ebenfalls ist zu beachten, dass im Falle des per Hand eingebrachten Impulses Unterschiede in der Signalqualität auftreten können. Insbesondere ist darauf zu achten, dass doppelte Schläge vermieden werden, weil sie deutlich die Qualität der Messung und die gemessenen Eigenfrequenzen beeinflussen.

Die Aufzeichnungsdauer sollte so festgelegt werden, dass die Schwingungen der vorhergegangenen Schläge möglichst vollständig abgeklungen sind. In diesem Fall sind keine Zeitfensterfunktionen erforderlich, womit die Qualität der Dämpfungsermittlung zunimmt. Zum Beispiel sind 20,48 s eine geeignete Zeitdauer, bei der bei einer Abtastrate von 20 Hz 4096 Werte anfallen. Dadurch wird eine Frequenzauflösung von 0,04 Hz erreicht. Schwingungsmoden mit sehr geringen Frequenzen können durch Hammerschläge also nicht zuverlässig identifiziert werden. Es ist anzumerken, dass auch längere Aufzeichnungsdauern verwendet werden sollten, weil der letzte Teil des Signals Umgebungsrauschen enthalten kann, das kein korreliertes Signal liefert.

Sind Abtastrate und Aufzeichnungsdauer einmal festgelegt, dann kann die spektrale Systemantwort z.B. wie folgt bestimmt werden:

(i) Auswahl der Stelle in Brückenlängsrichtung, an der die Hammerschläge ausgeführt werden sollen. Die Wahl dieser Stelle sollte anhand von im Voraus berechneten Schwingungsformen so erfolgen, dass möglichst wenige andere Schwingungsformen die Bewegungen an dieser Stelle beeinflussen. Je nach Lage der Schwingungsformen, die untersucht werden sollen, müssen mehrere Stellen festgelegt werden;

(ii) An jeder Schlagstelle R_i, und abhängig von der verfügbaren Anzahl von Beschleunigungsaufnehmern, werden successive Beschleunigungsaufnehmer angebracht. An jeder Messstelle, oder Gruppe von Messstellen, wird die Reaktion auf einem Hammerschlag an der Stelle R_j und das Signal am Hammer aufgezeichnet. Dabei sind die o.a. Regeln zur Signalerfassung zu beachten. In jeder Messkonfiguration wird 5 bis 10 mal gemessen;

(iii) Aus jedem Zeitsignal muss der Trend entfernt werden. Dann werden die Signale durch Berechnung des Autoleistungsspektrums in den Spektralbereich überführt: $\tilde{S}_{ii}(f)$ und $\tilde{S}_{jj}(f)$. Daraufhin werden die Kreuzleistungsspektren $\tilde{S}_{ij}(f)$ für die Reaktionen an der Stelle R_i, bei einer Impulseintragung an der Stelle R_j berechnet. Die Datensätze (5 bis 10 wurden erfasst) der Auto- und Kreuzleistungsspektren werden anschließend gemittelt:

$$S_{jj}(f) = E\left[\tilde{S}_{jj}(f)\right]$$

$$S_{ij}(f) = E\left[\tilde{S}_{ij}(f)\right]$$

Die Frequenz-Antwort Funktion $H_{ij}(f)$ (base on estimate H_2) wird mit

$$H_{ij}(f) = \frac{S_{ij}(f)}{S_{ii}(f)} \qquad \text{Eq. 5-2}$$

Und die Kohärenz $\gamma^2(f)$ mit

$$\gamma^2(f) = \frac{\left|S_{ij}(f)\right|^2}{S_{ii}(f)\ \ S_{jj}(f)} \qquad \text{Eq. 5-3}$$

Die Funktionen $H_{ij}(f)$ geben die dynamischen Eigenschaften des Tragwerks wider und stellen die Grundlage für Systemidentifikations-Algorithmen (im Frequenzbereich) zu genauen Bestimmung von Eigenfrequenzen f_k, Schwingungsformen $\underline{\varphi}_k$ und der entsprechenden Dämpfung ξ_k dar. Dagegen gibt $\gamma^2(f)$ Aufschluss über den

Zusammenhang (Korrelation) von Eingabesignal (Impuls) und Systemantwort.

Unterstellt man ein viskoses Dämpfermodell und die Systemantwort liegt in Form von Beschleunigungen vor, dann besteht zwischen den spektralen Antworten $H_{ij}(f)$ und den modalen Eigenschaften der Mode k, $(\varphi_i)_k$ und $(\varphi_j)_k$ an den Stellen R_i und R_j folgender Zusammenhang

$$H_{ij}(f) = \frac{-f^2(\varphi_i)_k(\varphi_j)_k}{(f_k^2 - f^2) + i\,(2\,\xi_k\, f_k\, f)} \qquad \text{Eq. 5-4}$$

5.3.1.2 Breitband-Shaker

Eine Breitbandanregung kann durch hydraulische oder elektrodynamische Shaker andauernd oder vorübergehend erfolgen. Vorübergehende Signale wie zum Beispiel zufällige Impulsfolgen werden wie Schwingungen durch Hammerschläge behandelt. Bei andauernden Signalen ist das Auswerten mit Zeitfenstern für jeden Kanal der Messungen erforderlich, um den Leakage-Effekt zu vermindern. Zusätzlich ist es üblich, dass sich die Zeitfenster überlappen, weil die Fensterfunktion Schwingungen an den Fensterrändern abmindern. Häufig werden dafür Hanningfenster mit einer Überlappung von 50 % verwendet. Dadurch kann die Zeitdauer der Messung an der Erregerstelle und dann den Messstellen deutlich reduziert werden.

5.3.1.3 Sinusförmige Shakeranregung

Die besten Messergebnisse werden durch die Schwingungsanregung mit Shakern erzielt, die eine harmonische Sinusschwingung in das Tragwerk einbringen. Voraussetzung ist allerdings, dass der Shaker ausreichende Kraft besitzt. Diese Voraussetzung ist bei geringen Frequenzen oft nicht erfüllt, auch wenn Fußgängerbrücken relativ weich sind.

Für die Bestimmung der Frequenz-Antwortfunktionen und für die Identifizierung von Schwingungsmoden und Dämpfungseigenschaften sind Vorabmessung der ambienten Schwingungen erforderlich, die Näherungen für die Eigenfrequenzen liefern. Sobald der Bereich, in dem die Eigenfrequenzen liegen, bekannt ist, können die Schwingungsmessungen ausgeführt werden. Eine Schwingungsmessung besteht aus der Messung mehrerer Einzelfrequenzen, wobei die Frequenz-Antwortfunktion Punkt für Punkt angefahren wird. Jeder Punkt gehört zum einem Frequenzpaar bestehend aus Erregerfrequenz und dem Frequenzgehalt an den Messstellen. Folgendes sollte beachtet werden:

(i) Obwohl es wünschenswert ist, die eingebrachte Erregerkraft zu messen, ist dies insbesondere bei Shakern mit Exzentermassen oft nicht möglich. Jedoch kann die eingebrachte Kraft bei diesen Shakern näherungsweise bestimmt werden;

(ii) Die genaue Bestimmung der Eigenfrequenz einer Konstruktion erfolgt durch eine sinusförmige Anregung und der Aufzeichnung der Systemantwort einer Stellen, an der mit einem deutlichen Schwingungsausschlag zu rechnen ist. Für jede Erregerfrequenz kann die

Schwingung an einer bestimmten Stelle ein kurzer Abschnitt des gesamten Messsignals, z.B. 512 Wertepaare, ausgewertet werden. Unter der Annahme, dass es sich bei dem Erregersignal um ein genaues Sinussignal handelt, können Amplitude und Phase der Schwingung durch eine Anpassung des Signals mit einem Einmassenschwingersignal ein Zeitbereich bestimmt werden. Der Punkt der Frequenz-Antwortfunktion wird durch das Verhältnis zur Erregeramplitude (gemessen oder berechnet) bestimmt;

(iii) Obwohl nur sehr kurze Messdauern benötigt werden, ist es erforderlich, dass der Shaker vor der Messung in jeder Frequenz mindestens eine Minute die Brücke anregt. So wird eine stabile Brückenschwingung erreicht;

(iv) Wenn die Eigenfrequenz bekannt ist, dann wird der Shaker auf diese Frequenz eingestellt und ein oder mehrere Beschleunigungsaufnehmer werden nacheinander an jeder Messstelle angebracht und die Signale über eine kurze Zeitdauer aufgezeichnet. Falls am Shaker kein Kraftaufnehmer existiert, dann sollte in der Nähe des Shakers ein Beschleunigungsaufnehmer platziert werden, der über die gesamte Dauer der Messung dort verbleibt. So werden gleichzeitig zwei Signale auf gezeichnet, die zur Auswertung der relativen Phase und Amplituden an der Messstelle dienen. Die entsprechenden Amplituden und Phasen-Verhältnisse ergeben die Anteile der Schwingungen am Messpunkt;

(v) Die höchste Qualität bei der Bestimmung der Dämpfung wird unter sinusförmiger Anregung erreicht. Dafür wird die Anregung plötzlich abgebrochen und das Ausschwingen des Systems gemessen. Wenn keine dicht benachbarten Moden vorliegen, ist es ausreichend, Verfahren wie beim Einmassenschwingen zur Auswertung der Dämpfung zu verwenden. Da die Dämpfung amplitudenabhängig ist, sollte sie in Ausschnitten wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben ausgewertet werden.

5.3.2 Messung der Grundschwingungen

Die Messung der Grundschwingungen (ambient vibrations) erfolgt in der Annahme, dass die Grundschwingung als weißes Rauschen idealisiert werden kann und in der relevanten Frequenzbandbreite stattfindet. Das bedeutet, dass in dem betrachteten Frequenzband alle Schwingungen mit einer konstanten Amplitude und Phase angeregt werden. Bei den aufgezeichneten Schwingungen handelt es sich damit um Hilfsgrößen. Werden aus diesen Messungen auf der Grundlage der Ergebnisse an mehreren Messstellen Frequenz-Auswertfunktionen bestimmt und daraus Schwingungsformen abgeleitet, dann handelt es sich dabei um Hilfsgrößen und nicht um die echten Moden. In dem Fall, dass die Eigenfrequenzen nicht zu dicht beieinander liegen und nur geringe Dämpfung besteht, stimmen die Hilfsgrößen gut mit den echten modalen Schwingungsformen überein. Liegen jedoch Eigenfrequenzen dicht zusammen, dann treten modale Überlagerungen auf, die nicht ignoriert werden können, und die als Hilfsgröße ermittelte Schwingungsform kann irreführend sein. Dennoch gibt es Verfahren, einzelne Schwingungsformen zu isolieren. So können die Messaufnehmer z.B. so platziert werden, dass sie Biegung und Torsion getrennt messen. Es besteht auch die Möglichkeit der Durchführung, einer entsprechenden Signalverarbeitung, z.B. durch das Verfahren der Bestimmung des stochastischen Unterraumes. Dieses Verfahren kann direkt auf den Beschleunigungs-Zeitschrieb oder der entsprechenden Kovarianzmatrizen angewendet werden [33] und wird z.B. in Mathlab (Macec) [37] angeboten. Auch andere kommerzielle Programme bieten das Verfahren und weitere wie die modale Zerlegung und das Polymax-Verfahren an, z.B. (Artemis) [38].

Auch wenn die Dämpfung durch sehr leistungsfähige Verfahren berechnet wird, ist die Genauigkeit begrenzt und die Ergebnisse sollten mit entsprechender Umsicht betrachtet werden. Es bleibt festzuhalten, dass es heute nicht nur Messaufnehmer gibt, die sehr kleine Schwingungen messen können, sondern für die Auswertung der Messdaten können sehr leistungsstarke Verfahren ([33], [34], [35]) verwendet werden.

Für die übliche Bestimmung der o.a. Hilfsfunktion der Schwingungsform müssen Frequenz-Antwortfunktionen aufgestellt werden. Die Vorgehensweise dazu wird in Abschnitt 5.3.1.2 beschrieben.

5.3.3 Messung freier Schwingungen

Das Zupfen an einem gespannten Seil kann wie die Eintragung eines Impulses betrachtet werden. Daher kann die Auswertung der Schwingung wie in Abschnitt 5.3.1.1 beschrieben unter der Annahme eines konstanten Frequenzspektrums für das Erregersignal vorgenommen werden. Ebenfalls ist es möglich, dass vom Erregersignal unabhängige Verfahren aus Abschnitt 5.3.2 zu verwenden. Auf jeden Fall können genauere Ergebnisse erzielt werden, als bei der Messung der Grundschwingungen.

5.4 Messgeräte

5.4.1 Messaufnehmer

Allgemein werden die Akzeptanzgrenzen für den Komfort von Fußgängern durch Beschleunigungen definiert.

Für die Messung von Bauwerken gibt es drei Gruppen von Beschleunigungsaufnehmern:

1. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer;
2. Piezoresistive und Kapazitive Beschleunigungssaufnehmer;
3. Force-balance Beschleunigungsaufnehmer (Servo-Beschleunigungssensor).

Im Vergleich zu den anderen Aufnehmertypen haben die piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer einige Vorteile. Sie brauchen zum Beispiel keine externe Stromversorgung, sie sind über lange Zeit robust und stabil, sie sind relativ unempfindlich gegenüber Temperaturschwankungen und sie besitzen eine große Linearität über einen weiten Frequenzbereich. Sie besitzen allerdings einen Ernst zu nehmenden Nachteil bei sehr weichen Konstruktionen, der in der Messung im niedrigen Frequenzbereich liegt. Viele piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer liefern nur im Frequenzbereich über 1 Hz lineare Signale. Es gibt aber auch Hersteller, die Beschleunigungsaufnehmer für sehr geringe Frequenzen anbieten.

Die piezoresistiven und kapazitiven, sowie die force-balanced Beschleunigungsaufnehmer sind passive Messaufnehmer, die eine externe

Stromversorgung benötigen, z.B. eine 5 – 15 V Gleichspannungsquelle. Sie arbeiten im niedrigen Frequenzbereich von 0 bis 50 Hz – 100 Hz und sind daher für die meisten Messungen an Bauwerken geeignet.

5.4.2 Geräte zur Schwingunganregung

5.4.2.1 Geräte zur Zwangserregung

Der Hammer ist das bekannteste und einfachste Gerät, um kontrollierte Schwingungen in eine Struktur oder ein Bauteil einzubringen. Im Bauwesen kann dieses Verfahren ebenfalls verwendet werden, wenn der Hammer bestimmte Eigenschaften aufweist. In Bild 5-1 ist zum Beispiel ein im Handel erhältlicher Hammer dargestellt, der etwa 55 N wiegt und dessen Kopf einen piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer mit einer Empfindlichkeit von 1 V/230 N, die maximale Kraft ist 22,0 kN besitzt. Der Frequenzbereich liegt bei 0 bis 500 Hz. Da Fußgängerbrücken in der Regel weich und schmal sind, erfüllt der Hammer hier die Voraussetzungen für die Anwendung. Es ist jedoch anzumerken, dass der Energieeintrag im unteren Frequenzbereich sehr klein ist, so dass diese unter Umständen in nicht messbarer Größe angeregt werden.

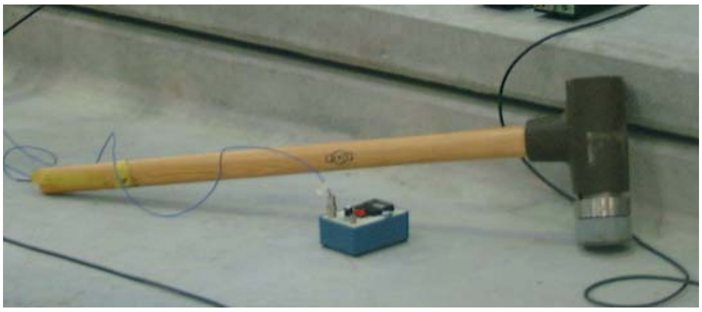


Bild 5-1: Hammer zur Schwingungsanregung im Bauwesen

Vibratoren für die Schwingungsanregung im Bauwesen werden in drei Bauweisen angeboten: elektromagnetische, hydraulische und mechanische. Der in Bild 5-2 dargestellte Vibrator ist ein auf dem Markt erhältliches Geräte, das etwa 800 N wiegt, einen Arbeitsbereich von 0 - 200 Hz besitzt und maximal eine Kraft von 445 N bei Frequenzen über 0,1 Hz einbringt. Das Gerät kann für horizontale und vertikale Schwingungsanregung verwendet werden und wird durch einen einzelnen Generator angetrieben, der die Schwingung erzeugt. In der Regel sind die erzeugten Schwingungssignale sinusförmig oder auch zufällig. Die bei der Schwingungsanregung eingebrachten Lasten können durch Kraftzellen zwischen Schwingungsanreger und Tragwerk gemessen werden. Wegen der begrenzten Last, die elektro-dynamische Shaker einbringen können, ist nur durch die Anregung kleiner oder mittelgroßer Tragwerke möglich. Im Gegensatz dazu können hydraulisch oder mechanisch betriebene Shaker auch große Tragwerke in Schwingung versetzen. Mechanische Shaker besitzen exzentrisch angebrachte Massen, durch die eine Sinusförmige Anregung in unterschiedlichen Frequenzbereichen erzeugt wird. Wegen des umfangreichen Versuchsaufbaus werden diese Shaker zur Zeit nur selten verwendet.

Bild 5-2: Elektromagnetischer Shaker für die Anwendung im Bauwesen, hier für vertikale Schwingen eingerichtet

5.4.2.2 Messung der Belastung durch Fußgänger

In Arbeiten von Fujino [36] wird gezeigt, wie Bewegungsverhalten von Fußgängern anhand der Bewegung ihres Kopfes und ihrer Schultern durch Videoaufnahme und Bildbearbeitung gemessen werden kann.

6 Kontrolle von Schwingungen

6.1 Einführung

Die Schwingungen von Fußgängerbrücken können durch Veränderung der Brückenmasse, der Eigenfrequenz oder der Dämpfung beeinflusst werden. Bei bestehenden Brücken besteht der einfachste Weg, das Schwingungsverhalten zu beeinflussen, darin, die Dämpfung zu erhöhen. Das kann durch den Einbau von Dämpferelementen oder auch durch die Aktivierung von Teilen der Brückenausstattung z.B. des Gebäudes oder des Brückendecks erfolgen.

6.2 Veränderung der Masse

Keine weiteren Hintergrundinformationen zum Leitfaden.

6.3 Verändern Eigenfrequenz

Möglichkeiten, die Eigenfrequenz zur verändern, bestehen zum Beispiel darin, das Brückendeck nicht aus einzelnen Betonfertigteilplatten sondern aus einer durchgehenden Ortbetonplatte zu errichten. Außerdem kann das Brückengeländer so geplant werden, dass es als Tragelement mitwirkt.

Gegebenenfalls sind auch weiterreichende Maßnahmen wie zum Beispiel der Einsatz einer Konstruktion mit Tragseilen möglich. Bei vertikalen Schwingungen kann die Bauhöhe des Brückenträgers oder –Fachwerks erhöht oder die Fläche des Unterflansches vergrößert werden. Bei seitlichen Schwingungen ist die Verbreiterung des Brückendecks häufig die effizienteste Lösung. Bei

Seilkonstruktionen kann die seitliche Anordnung der Seilfußpunkte ebenfalls die Seitensteifigkeit erhöhen. Das Schwingungsverhalten von Schrägseilbrücken kann durch den Einsatz eines zentralen A-Pylons gegenüber der Verwendung zweier unabhängiger Pylone positiv beeinflusst werden.

6.4 Veränderung der Dämpfung

6.4.1 Einführung

Keine weitere Hintergrundinformation zum Leitfaden.

6.4.2 Einfache Maßnahmen

Keine weitere Hintergrundinformation zum Leitfaden.

6.4.3 Zusätzliche Dämfungselemente

Als zusätzliche Dämpferelemente gibt es Viskose Dämpfer, Massedämpfer (TMD), Pendeldämpfer, Flüssigkeitssäulendämpfer (TLCD) und Flüssigkeitsdämpfer (TLD). Am häufigsten werden Viskose und Massedämpfer verwendet.

In Tabelle 6-1 werden einige Brücken systematisch mit ihren Eigenschaften den eingebauten Dämpfertypen und die Wirkung der Dämpfer auf das Gesamtschwingungsverhalten aufgelistet.

Tabelle 6-1: Fußgängerbrücken, in die Dämpfer installiert wurden

Brücke	Kontrollierte Frequenzen (Hz)	Anzahl der Felder und Spannweiten (m)	Bauart	Maßgebende Schwingungsrichtung	Art der verwendeten Dämpfer	Einfluss der Dämpfungsmaßnahme auf das Gesamtverhalten	Ref.
T-Bridge, Japan	0,93 Hz	Zwei Felder 45m +134m	Schrägseilsystem mit durchlaufenden Kastenträger	Seitlich	Flüssigkeitsdämpfer mit Schwallprinzip innerhalb des Kastenträgers. Insgesamt 600 Behälter mit einem Masseverhältnis von 0,7% der modalen Masse für die seitliche Richtung.	Die seitliche Schwingungsamplitude wurde von 8,3mm auf 2,9mm reduziert.	[15]

Brücke	Millennium Bridge, London	Fußgängerbrücke Britzer Damm, Berlin	Brücke Schwedter Straße, Berlin	Mjomnesundet bridge, Norway	Fußgängerbrücke in einem großen Atrium
Kontrollierte Frequenzen (Hz)	0,8 (main) 0,5 1,0	5,6	1,9 Hz	0,8	4,3
Anzahl der Felder und Spannweiten (m)	Drei Felder 108m +144m +80m	Einfeldsystem 33,83m	Einfeldsystem 209m	3 Felder	1 Feld 28
Bauart	Hängebandbrücke	2 verbundene gelenkige Bögen mit orthotroper Brückenplatte	Bogen und Schrägseile	Träger (Stahlkasten)	Stahlträger
Maßgebende Schwingungsrichtung	Seitlich	Vertikal	Verikal	Vertikal	Vertikal
Art der verwendeten Dämpfer	Viskose Dämpfer und Massedämpfer zur Kontrolle der seitlichen Schwingungen,. vertikal wirkende Massedämpfer für den Frequenzbereich von 1,2 bis 2,0Hz	2 vertikal wirkende Massedämpfer, jeweils 520 kg Eigengewicht	4 vertikal wirkende Massedämpfer, jeweils 900 kg Eigengewicht	1 vertikal wirkende Massedämpfer, jeweils 600 kg Eigengewicht	2 vertikal wirkende Massedämpfer, jeweils ≈1000 kg Eigengewicht; Masseverhältnisse von ≈5% der modalen Masse
Einfluss der Dämpfungsmaßnahme auf das Gesamtverhalten	Die Schwingungen wurden nicht wahrnehmbar.				
Ref.	[16]	[17]	[17]	[17]	[18]

Brücke	Kontrollierte Frequenzen (Hz)	Anzahl der Felder und Spannweiten (m)	Bauart	Maßgebende Schwingungsrichtung	Art der verwendeten Dämpfer	Einfluss der Dämpfungsmaßnahme auf das Gesamtverhalten	Ref.
Fußgängerbrücke als Einfeldträger	1,84Hz	1 Feld 47,4	Träger (Stahlkasten)	Vertikal	1 vertikal wirkender Massedämpfer; Masseverhältnisse von 1% der modalen Masse	Erhöhung der Dämpfung um den Faktor 12,7	[19]
Fußgängerbrücke Bellagio to Bally's, Las Vegas	1,7 to 2,2	1 Feld	Träger (Stahlkasten)	Vertikal	6 vertikal wirkende Massedämpfer	Erhöhung der Dämpfung um den Faktor 16	[20]
Fußgängerbrücke Forchheim, Germany	1,0 to 3,0	117,5	Schräseilbrücke	Vertikal	1 vertikal wirkender Massedämpfer		[21]
Fußgängerbrücke Stade de France, Paris	1,95	-	Träger	Vertikal	Vertikal wirkende Massedämpfer mit 2400 kg pro Feld	Erhöhung der Dämpfung von 0,2-0,3% auf 4,3-5,3%	[8]
Fußgängerbrücke Solférino, Paris	0,81 1,94 2,22	106 Mittenspannweite	Bogen	Seitlich Vertikal Vertikal	1 Seitlich wirkender Massedämpfer 15000kg und 2 vertikal wirkender Massedämpfer mit 10000kg bzw. 7600kg	Erhöhung der Dämpfung von 0,4% auf 3,5% (seitlich), und von 0,5% to 3% und 2% (vertikal)	[8]

Brücke	Kontrollierte Frequenzen (Hz)	Anzahl der Felder und Spannweiten (m)	Bauart	Maßgebende Schwingungsrichtung	Art der verwendeten Dämpfer	Einfluss der Dämpfungsmaßnahme auf das Gesamtverhalten	Ref.
Fußgängerbrücke Pedro e Inês, Coimbra	0,85 1,74; 1,80;2,34; 2,74; 3,07; 3,17	110m Mittelspannweite	Flacher Bogen und Träger	Seitlich Vertikal	1 Seitlich wirkender Massedämpfer 14800kg und 6 vertikal wirkender Massedämpfer	Erhöhung der seitlichen Dämpfung von 0,5% auf 4% und der vertikalen Dämpfung von 0,3%-2,2% auf 3%- 6%	[17]

6.4.3.1 Viskose Dämpfer

Die Kraftübertragung eines viskosen Dämpfers wird allgemein beschrieben durch

$$F_{damper} = CV^{\alpha} \qquad \text{Eq. 6-1}$$

Dabei ist:

C = die Dämpferkonstante (N.sec/m)

V = die Geschwindigkeit (m/sec)

α = der Geschwindigkeitsexponent ($0,3 \leq \alpha \leq 1,0$)

Der Einbau eines solchen Dämpfers in ein Tragwerk hat zur Folge, dass bei der Berechnung die Dämpfungsmatrix nicht mehr proportional zu Massen- und Steifigkeitsmatrix ist. Der Dämpfer kann rechnerisch dadurch berücksichtigt werden, dass die entsprechenden Dämpferkonstanten in die proportionale Dämpfungsmatrix entsprechend der Freiheitsgrade, die sie beeinflussen, addiert werden. Ein besonderer Vorteil viskoser Dämpfer besteht in der Möglichkeit, gleichzeitig mehrere Schwingungsformen zu beeinflussen. Bei Brücken mit Deckkrümmung im Grundriss, die mehr als eine maßgebliche Verschiebungsrichtung aufweisen, kann die Installation eines Dämpfers zum Beispiel im Lagerbereich einige Schwingungsmoden mit entsprechenden Richtungsanteilen gut dämpfen. Allerdings ist der viskose Dämpfer im Vergleich zu anderen Dämpfertypen nicht immer die beste Lösung. Der Grund liegt darin, dass viskose Dämpfer auf die Relativverschiebung der beiden Befestigungspunkte reagiert. Wenn die zur Verfügung stehenden Befestigungspunkte für einen Dämpfer nur geringe Relativverschiebungen zueinander aufweisen, dann sind viskose Dämpfer ungeeignet und es sollten TMDs oder TLSs in Erwägung gezogen werden. Bild 6-1 zeigt eine Anwendung von viskosen Dämpfern, die zwischen Brückendeck und Pylon installiert wurden.

Bild 6-1: Viskose Dämpfer an einer Fußgängerbrücke in Minden (Deutschland)

6.4.3.2 Massedämpfer (TMD)

Massedämpfer (englisch: „Tuned mass dampers (TMDs)" werden üblicherweise so eingestellt, dass beide gedämpften Systeme als Spitzenwert die gleiche dynamische Verschiebung besitzen. Für diese Dämpfer wurden auf Grundlage der dynamischen Bewegungsgleichungen Bemessungskurven abgeleitet, die in der Literatur zu finden sind [18], [23].

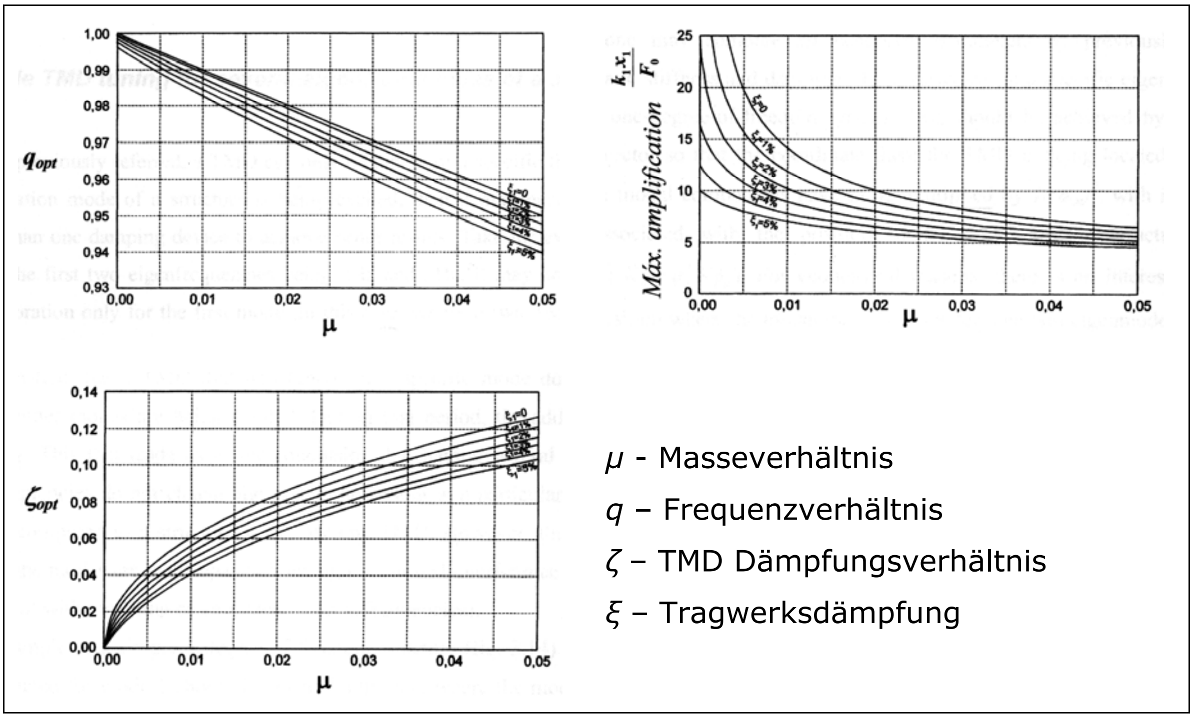


Bild 6-2: Bemessungskurven für TMDs

Die Bemessung erfolgt in folgenden Schritten:

1. Wahl der Masse m_d des TMD. Sie wird anhand des Verhältnisses zur modalen Masse m_s des Tragwerks festgelegt ($\mu=m_d/m_s$). Übliche Werte für das Massenverhältnis liegen im Bereich von 0,01 to 0,05.
2. Berechnung des optimalen Frequenzverhältnisses δ zwischen der Eigenfrequenz des TMD , f_d, und Tragwerkseigenfrequenz f_s ($\delta=f_d/f_s$) [18].

$$\delta_{opt} = \frac{1}{(1+\mu)} \qquad \text{Eq. 6-2}$$

3. Berechnung des optimalen TMD Dämpfungsgrades ξ_{opt} [18]

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \qquad \text{Eq. 6-3}$$

4. Berechnung der TMD-Konstanten:

   Federkonstante: $k_d = (2\pi f_d)^2 m_d$ Eq. 6-4

   Dämpferkonstante: $c_d = 2m_d(2\pi f_d)\xi_{opt}$ Eq. 6-5

Die Leistungsfähigkeit eines TMD wird durch Verstimmungen sehr stark herabgesetzt. Durch Fußgängerlasten oder Veränderungen am Brückenbauwerk können bereits kleine Verstimmungen auftreten. Daher sollte die Wirkung eines TMD für einen Frequenzbereich bestimmt werden.

6.4.3.3 Pendeldämpfer

Unter Vernachlässigung der Rotationsträgheit der Pendelmasse kann die kann die Pendeleigenfrequenz wie folgt berechnet werden:

1. Wählen eines Massenverhältnisses $\mu = m_d/m_s$;
2. Berechnen des Parameters $r_d = \frac{I_d}{m_d L}$, dabei ist I_d das Massenträgheitsmoment um den Aufhängepunkt, m_d ist die Masse des Dämpfers und L ist die Länge vom Aufhängepunk zum Schwerpunkt der Masse. Wenn die Masse als Punktmasse angesetzt wird, dann ist $r_d=1$.
3. Berechnung des optimalen Frequenzverhältnisses unter Berücksichtigung eines Rauschens der Erregerkraft [24]

$$\kappa_{opt} = \frac{\sqrt{1+\mu\left(1-\frac{1}{2\,r_d}\right)}}{1+\mu} \qquad \text{Eq. 6-6}$$

4. Berechnung des optimalen Dämpfungsgrades [24]

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{\mu+\mu^2\left(1-\frac{1}{4\cdot r_d}\right)}{4r_d+2\mu(4r_d-1)+2\mu^2(2r_d-1)}} \qquad \text{Eq. 6-7}$$

5. Berechnung der Pendellänge $L = \frac{g}{(2\pi f_d)^2}$, wobei g die Erdbeschleunigung bezeichnet und $f_d = f_{structure} \times \kappa_{opt}$ ist.

6.4.3.4 Flüssigkeitssäulendämpfer (TLCD)

Die Abstimmung eines Flüssigkeitssäulendämpfers (englisch: "Tuned liquid column damper – TLCD") basiert auf Analogien zu den Parametern eines entsprechenden TMD. Auf dieser Grundlage entwickelte Hochrainer [25] optimierte Auslegungsparameter für TLCDs.

Das Verhältnis der Wassermasse zu Tragwerksmasse sollte im gleichen Größenbereich wie bei TMDs liegen, also im Bereich 0,01 to 0,05 [25].

Der Bemessungsablauf wird hier für einen Flüssigkeitssäulendämpfer mit vertikalen Säulen ($\beta=\pi/2$) und konstanten Querschnitt ($A_h = A_b$) vorgestellt:

1. Berechne das TMD-äquivalente FLüssigkeitsmassenverhältnis:

$$\mu^* = \frac{\mu}{\kappa^2 + \mu(\kappa^2 - 1)} \qquad \text{Eq. 6-8}$$

Dabei ist μ zuvor gewählte TMD-Massenverhältnis und κ ist ein Geometrie-Koeffizient:

$$\kappa = \frac{B + 2H\cos\beta}{L_{eff}} \qquad \text{Eq. 6-9}$$

mit

$$L_{eff} = 2H + \frac{A_H}{A_B}B \qquad \text{Eq. 6-10}$$

Der für κ muss festgelegt werden, wobei er so hoch wie möglich gewählt werden sollte. Er sollte aber noch unter 0,8 liegen [26], um nichtlineares Verhalten zu verhindern.

2. Berechne das Optimum TLCD Frequenzverhältnis:

$$\delta^*_{opt} = \frac{\delta_{opt}}{\sqrt{1 + \mu^*(1 - \kappa^2)}} \qquad \text{Eq. 6-11}$$

Wobei δ_{opt} das zuvor berechnete TMD-Frequenzverhältnis ist.

3. Die Werte H und B werden mit den folgenden Gleichungen bestimmt:

$$\begin{cases} B = \dfrac{2g\sin(\beta)}{(\delta^*_{opt}\omega_{structure})^2}\kappa - 2H\cos(\beta) \\[2ex] H = \dfrac{B + 2H\cos(\beta)}{2\kappa} - \dfrac{A_H}{2A_B}B \end{cases} \qquad \text{Eq. 6-12}$$

B ergibt sich direkt aus der ersten Gleichung $\beta = \pi / 2$ ist. Ebenfalls kann H direkt aus der zweiten Gleichung ermittelt werden *(A_h / A_b = 1 und $\cos(\beta)$ = 0)*.

4. Berechnen der Querschnittsflächen A_h und A_b über die Masseerhaltung:

$$(A_b B + A_h 2H)\gamma_{liquid} = M_{struct}\mu^* \qquad \text{Eq. 6-13}$$

$$A_h = A_b = \frac{M_{struct}\mu^*}{(B + 2H)\gamma_{liquid}} \qquad \text{Eq. 6-14}$$

Die optimale Dämpfung eines TLCD sollte genau so groß sein, wie die des äquivalenten TMD. Ein TLCD besitzt durch Turbulenzen bei der Flüssigkeitsströmung eine innere Dämpfung. Durch den Einbau von Ventilen oder Düsen in der horizontalen Röhre kann die Leistungsfähigkeit weiter gesteigert werden. Allerdings liegt keine Literatur mit Angabe der Wirkung dieser Einbauten vor, so dass die Wirkung immer an Prototypen bestimmt werden muss.

6.4.3.5 Flüssigkeitsdämpfer

Diverse Vorteile wie geringe Kosten, die geringe Verzögerung, das einfache Einstellen der Eigenfrequenz und die einfache Installation an bestehenden Bauwerken [27] haben zu einem gestiegenen Interesse an diesen Dämpfern geführt.

Die Frequenz eines Flüssigkeitsdämpfer (englisch: „ Tuned Liquid Damper – TLD“) kann nach [26] der linearen Theorie von Lamb berechnet werden mit:

$$\omega_{d,lin} = \sqrt{\frac{\pi g}{L} tanh\left(\frac{\pi h_0}{L}\right)} \qquad \text{Eq. 6-15}$$

Einen Vorschlag der TLD-Auslegung unter Verwendung einer Analogie zu TMD über experimentelle Vergleiche mit Prototyptanks kommt von Sun et al. [28]. Ebenfalls führten Experimente von Yu et al. [29] zu einem nichtlinearen äquivalenten TMD, wobei verschiedene Lastbedingungen berücksichtigt werden. In dieser Formulierung wird der Versteifungseffekt bei großen Bewegungen mit berücksichtigt.

Im nicht linearen Steifigkeits- und Dämpfermodell (NDS) wird angenommen, dass unabhängig von der Amplitude der Anregung 100 % der Dämpferflüssigkeit aktiviert wird.

Die Auslegung von TLDs kann durch das folgende Verfahren, das durch empirische Anpassung von experimentellen Ergebnissen entwickelt wurde, durchgeführt werden, wobei die Nichtlinearität mit berücksichtigt wird:

1. Grundlage ist der Mittelwert oder der häufige Wert der Amplitude der Brückenverschiebung X_s (bestimmt unter Berücksichtigung des eingebauten Dämpfers)
2. Bestimmung des dimensionslosen Erregerparameters $\Lambda=X_s/L$, wobei L die Länge des Tanks in Schwingungsrichtung bezeichnet.
3. Berechnung des Dämpfungsgrades $\xi = 0,5\Lambda^{0,35}$
4. Berechnung des Frequenzverhältnisses χ zwischen der nichtlinearen und der linearen TLD-Frequenz nach der TLD-Lamb-Gleichung:

   $\chi = 1,038\Lambda^{0,0034}$ for $\Lambda \le 0,03$ (weiche Wellenbrechung)

   $\chi = 1,59\Lambda^{0,125}$ for $\Lambda > 0,03$ (harte Wellenbrechung)
5. Berechnung der Füllhöhe, wobei der Versteifungsparameter χ berücksichtigt wird. Dabei wird angenommen, dass die beste Abstimmung erreicht wird, wenn die TLD-Frequenz mit der Tragwerksfrequenz (f_s) übereinstimmt:

   $$h_0 = \frac{L}{\pi} tanh^{-1}\left(\frac{4\pi L f_s^2}{g\chi^2}\right) \qquad \text{Eq. 6-16}$$

   g – Erdbeschleunigung (9,81 m/s^2)
6. Wählen der Tankbreite oder Tankanzahl entsprechend des erforderlichen Massenverhältnisses für die Strukturdämpfung. Das Massenverhältnis des Wassers sollte im gleichen Bereich liegen wie bei TMDs, also 0,01 bis 0,05.

Für numerische Berechnungen kann ein äquivalentes TMD verwendet werden. Wenn die Amplituden des Brückendecks sehr klein sind (unter 1 cm), dann darf die aktive Masse, m_d zu etwa 80% der Flüssigkeitsmasse angenommen werden [28]. Die Steifigkeit k_d wird mit der Gleichung $k_d = (\chi\omega_{d,lin})^2 m_d$ bestimmt. Der Dämpfungsgrad ist der des TLDs.

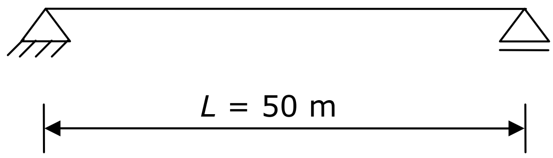
7 Berechnungsbeispiele

7.1 Einfeldträger

Die Berechnung des wiederkehrenden Gebrauchszustandes wird an einer Fußgängerbrücke mit einer Spannweite von 50 m vorgestellt.

Die Brücke besitzt die folgenden Eigenschaften:

Breite des Brückendecks $b = 3$ m
Spannweite $L = 50$ m
Masse $m = 2{,}5\times10^3$ kg/m
Steifigkeit $EI_{vert} = 2{,}05\times10^7$ kNm²
$EI_{lat} = 2{,}53\times10^5$ kNm²
Dämpfungsgrad $\xi = 1{,}5$ %



Tragsystem

Der Brückenbetreiber wünscht mittleren Schwingungskomfort bei geringen Fußgängerverkehr ($d = 0{,}2$ P/m²) und geringen Komfort bei sehr dichten Fußgängerverkehr ($d = 1{,}0$ P/m²), der bei der Einweihung erwartet wird. Außerdem soll der seitliche Lock-in durch Fußgänger-Brückeninteraktion vermieden werden.

Lastsituation	Gewünschter Komfort
$d = 0{,}2$ P/m² $n = 50\times3\times0{,}2 = 30$	$a_{limit,vert} \leq 1{,}0$ m/s² $a_{limit,hor} \leq 0{,}1$ m/s²
$d = 1{,}0$ P/m² $n = 50\times3\times1{,}0 = 150$	$a_{limit,vert} \leq 2{,}5$ m/s² $a_{limit,hor} \leq 0{,}1$ m/s²

1. Berechnung der Eigenfrequenz und modalen Masse

$$f_{1,vert} = \frac{1}{2\pi}\frac{9{,}869}{L^2}\sqrt{\frac{EI_{vert}}{m}} = 1{,}8 \text{ Hz} \qquad f_{2,vert} = \frac{1}{2\pi}\frac{39{,}478}{L^2}\sqrt{\frac{EI_{vert}}{m}} = 7{,}2 \text{ Hz}$$

$$f_{1,lat} = \frac{1}{2\pi}\frac{9{,}869}{L^2}\sqrt{\frac{EI_{lat}}{m}} = 0{,}2 \text{ Hz} \qquad f_{2,lat} = \frac{1}{2\pi}\frac{39{,}478}{L^2}\sqrt{\frac{EI_{lat}}{m}} = 0{,}8 \text{ Hz}$$

$M = ½\, m\, L = 62{,}5\times10^3$ kg

2. Berechnung der charakteristischen Maximalbeschleunigung

a. for $d = 0{,}2$ P/m²

$$a_{\max,vert} = k_{a,95\%}\sqrt{\frac{C\,\sigma_F^2}{M_i^2}k_1\xi^{k_2}} = 0{,}58 \text{ m/s}^2,$$

$a_{d,vert} = \psi_1 \times a_{\max,vert} = 0{,}4 \times 0{,}58 = 0{,}23$ $< 1{,}0$ m/s² ✓

mit C = 2,95 $\sigma_F^2 = 1{,}2\times10^{-2}\times30 = 0{,}36$ kN² $k_{a,95\%} = 3{,}92$

$k_1 = -0{,}07\times1{,}8^2 + 0{,}6\times1{,}8 + 0{,}075 = 0{,}9282$

$k_2 = 0{,}003\times1{,}8^2 - 0{,}04\times1{,}8 - 1 = -1{,}06228$

$$a_{\max,lat} = k_{a,95\%}\sqrt{\frac{C\,\sigma_F^2}{M_i^2}k_1\xi^{k_2}} = 0{,}087 \text{ m/s}^2 \qquad < 0{,}1 \text{ m/s}^2 \ ✓$$

mit C = 6,8 $\sigma_F^2 = 2{,}85\times10^{-4}\times30 = 8{,}55\times10^{-3}$ kN² $k_{a,95\%} = 3{,}77$

$k_1 = -0{,}08\times0{,}8^2 + 0{,}5\times0{,}8 + 0{,}085 = 0{,}5362$

$k_2 = 0{,}005\times0{,}8^2 - 0{,}06\times0{,}8 - 1{,}005 = -1{,}0498$

b. für d = 1,0 P/m²

$$a_{\max,vert} = k_{a,95\%}\sqrt{\frac{C\,\sigma_F^2}{M_i^2}k_1\xi^{k_2}} = 1{,}05 \text{ m/s}^2$$

$a_{d,vert} = \psi_1 \times a_{\max,vert} = 0{,}4 \times 1{,}05 = 0{,}42$ $< 2{,}5$ m/s² ✓

mit C = 3,7 $\sigma_F^2 = 7{,}0\times10^{-3}\times150 = 1{,}05$ kN² $k_{a,95\%} = 3{,}80$

$k_1 = -\,0{,}07\times1{,}8^2 + 0{,}56\times1{,}8 + 0{,}084 = 0{,}8652$

$k_2 = 0{,}004\times1{,}8^2 - 0{,}045\times1{,}8 - 1 = -1{,}06804$

$$a_{\max,lat} = k_{a,95\%}\sqrt{\frac{C\,\sigma_F^2}{M_i^2}k_1\xi^{k_2}} = 0{,}20 \text{ m/s}^2 > 0{,}1 \text{ m/s}^2$$

Risiko der Interaktion Fußgänger-Brücke!

mit C = 7,9 $\sigma_F^2 = 2{,}85\times10^{-4}\times150 = 4{,}275\times10^{-2}$ kN² $k_{a,95\%} = 3{,}73$

$k_1 = -0{,}08\times0{,}8^2 + 0{,}44\times0{,}8 + 0{,}096 = 0{,}4992$

$k_2 = 0{,}007\times0{,}8^2 - 0{,}071\times0{,}8 - 1 = -1{,}05232$

7.2 Fußgängerbrücke über die Weser in Minden

Die hier vorgestellte Fußgängerbrücke über die Weser in Minden verbindet die Innenstadt mit einem Park. Es handelt sich um eine Hängebrücke, die im Grundriss gekrümmt ist. Sie besitzt eine Länge von 180 m, 2 geneigte Rohrprofil-Pylone und eine Brückendeckbreite von 3,5 m (3,0 m Gehweg) aus Stahlbeton. Die Spannweite des Mittelfeldes beträgt 103 m.

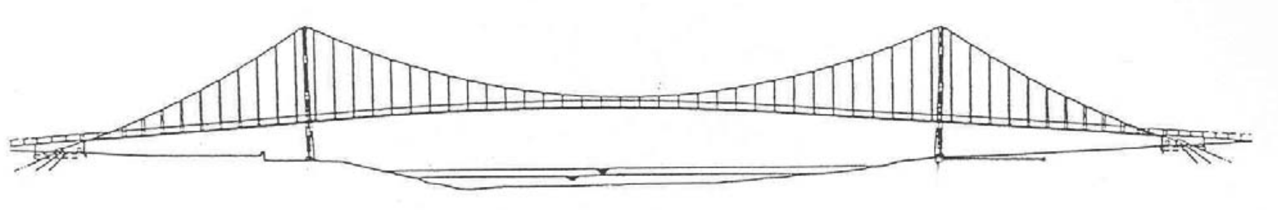


Bild 7-1: Ansicht

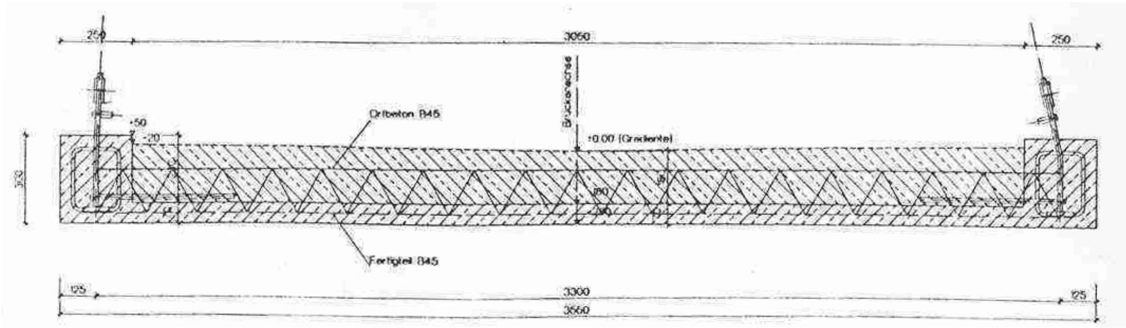


Bild 7-2: Querschnitt

In der nachstehenden Tabelle sind die Eigenfrequenzen und die Anzahl der zugehörigen Sinus-Halbwellen bis zu einer Frequenz von 3,00 Hz aufgelistet.

Tabelle 7-1: Beschreibung der Eigenfrequenz

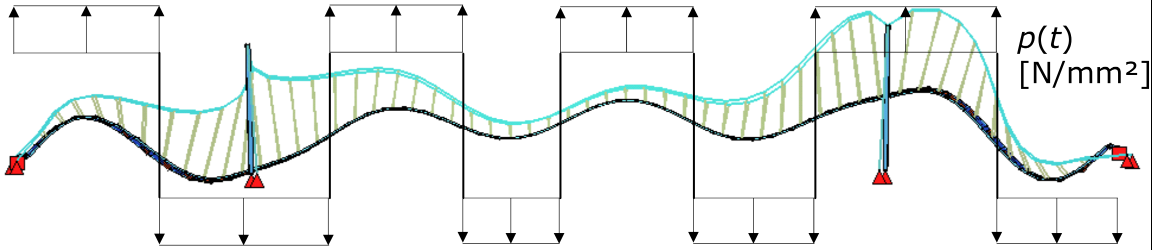
Mode Nr.	Eigenfrequenz [Hz]	Anzahl der Sinus-Halbwellen	Beschreibung der Schwingungsform
1	0,24		Horizontal in Längsrichtung
2	0,25	1	Horizontal
3	0,40	2	Vertikal
4	0,41	3	Vertikal
5	0,61	5	Vertikal
6	0,61	6	Vertikal
7	0,75	2	Horizontal / Torsion
8	0,90	4	Vertikal
9	0,95	7	Vertikal
10	1,21	5	Vertikal
11	1,42	8	Vertikal
12	1,47	9	Vertikal
13	1,60	3 / 1	Seil / horizontal + Torsion
14	1,63	10	Vertikal
15	1,73	-	Seilschwingung / horizontal + Torsion
16	1,77	-	Seilschwingung / vertikal + Torsion
17	1,82	-	Seilschwingung / vertikal + Torsion

Mode Nr.	Eigenfrequenz [Hz]	Anzahl der Sinus-Halbwellen	Beschreibung der Schwingungsform
18	1,96	11	Seil / vertikal
19	2,07	11	Seilschwingung / vertikal + Torsion
20	2,13	-	Seilschwingung
21	2,27	-	Seilschwingung
22	2,36	12	Seil / vertikal
23	2,57	-	Seilschwingung + Vertikal
24	2,59	-	Seilschwingung
25	2,64	13	Seil / vertikal
26	2,73	-	Seilschwingung
27	2,79	-	Seilschwingung
28	2,89	14	Vertikal
29	2,91	4	Horizontal + Torsion
30	2,96	-	Seilschwingung
31	3,15	-	Seilschwingung

Die Tabelle zeigt, dass einige Eigenfrequenzen mit ihren Schwingungsformen im kritischen Frequenzbereich liegen und daher durch Fußgänger angeregt werden können. Im einer dynamischen Berechnung müssen alle kritischen Frequenzen untersucht werden. Im Rahmen dieses Beispiels wird jedoch die elfte Mode mit ihren 8 Halbwellen untersucht.

Eine Zusammenfassung der dynamischen Eigenschaften und den Lasteinsätzen gibt Tabelle 7-2.

Tabelle 7-2: Zusammenfassung der Brückeneigenschaften



(Überhöhte Darstellung der Schwingungsform)

Gesamtlänge	L = 180 m
Deckbreite	B = 3,0 m
Berechnete Schwingungsform	11te Mode
Beschreibung der Schwingungsform	Vertikalschwingung – 8 Wellen
Frequenz	f = 1,42 Hz
Belastete Brückenfläche	$S = L \times B$ = 540 m²
Modale Masse	$m^*(f)$ = 80,5 t
Dämpfung (log. Dekrement)	δ = 0,085

Wie auch in der kürzlich veröffentlichten SETRA/AFGC Brückenguideline [9] sieht das vorgestellte Bemessungskonzept vor, die Belastung in Richtung der zur Schwingungsform gehörenden Verformung aufzubringen.

Durch die verschiedenen Lastrichtungen wird eine Phasenverschiebung von 180° oder π der auf der Brücke gehenden Fußgänger abgebildet. Dieser Ansatz kann als vollständige Synchronisation zwischen den einzelnen Fußgängern und dem Schwingungsbauch, den der Fußgänger erreicht oder passiert, verstanden werden.

Die Bemessungssituation wird durch die Verkehrsklasse in Zusammenhang mit einer Komfortklasse definiert. Grundsätzlich sollten verschiedene Verkehrssituationen untersucht werden. In diesem Beispiel wird sich jedoch auf eine Situation beschränkt. Die Fußgängerbrücke verbindet die Innenstadt mit einem Erholungsgebiet, dem Park, so dass hier die Verkehrsklasse TC2, leichter Verkehr mit 0,2 P/m² (siehe Abschnitt 4.3) in Verbindung mit der Anforderung "maximaler Komfort CL1" (Amplituden kleiner als 0,5 m/s²) gewählt wird.

Tabelle 7-3: Beschreibung des Bemessungsfalls

Bemessungssituation	Gewählte Verkehrsklasse	Gewählte Komfortklasse
1. Kombination	TC 2: Leichter Verkehr	CL 1: Maximaler Komfort

Bei einer dynamischen Berechnung sollten mehrere Verkehrssituationen untersucht werden, zum Beispiel Situationen mit höheren Personendichten, die seltener auftreten und möglicherweise geringere Komfortanforderungen besitzen.

Das Lastmodell dieses Bemessungsleitfadens wie auch dass der SETRA/AFGC Bemessungshilfe wird hier auf die Fußgängerbrücke Minden angesetzt und die dynamische Antwort wird berechnet. Das Lastmodell für den Fußgängerstrom wird entsprechend des Bemessungsleitfadens als verteilte Last $p(t)$, wie oben beschrieben entsprechend der Schwingungsform angesetzt. Die Größe der oszillierenden Last ergibt sich nach folgenden Gleichungen:

$$F(t) = P\cos(2\pi ft) = 280\cos(2\pi \times 1{,}42\,t) \quad [N] \qquad \text{Eq. 7-1}$$

$$n = S \times d = 108 \qquad mit \quad d = 0{,}2 \; {}^{P}\!/_{m^2} \qquad \text{Eq. 7-2}$$

$$n' = \frac{10{,}8\sqrt{\xi \times n}}{S} = 0{,}024 \; {}^{1}\!/_{m^2} \qquad mit \quad \xi = {}^{\delta}\!/_{2\pi} \qquad \text{Eq. 7-3}$$

$$p(t) = F(t)\,n'\,\psi \qquad mit \quad \psi = 0{,}7 \qquad \text{Eq. 7-4}$$

$$p(t) = 280\cos(2\pi \times 1{,}42\,t) \times 0{,}024 \times 0{,}7$$

$$p(t) = 4{,}74\cos(8{,}92\,t) \quad [N/m^2]$$

Die Berechnungen mit der FE-Methode ergeben die folgenden Maximalbeschleunigung:

$$a_{max} = 0{,}38 \le a_{CL1} = 0{,}50 \; [m/s^2] \qquad \text{Eq. 7-5}$$

Die Grenzbeschleunigung der Komfortklasse CL1 wird also eingehalten. Damit ist der Gebrauchszustand unter dieser Verkehrsbelastung nachgewiesen.

Untersuchungen mit dem spektralen Lastmodell für Fußgängerströme

Im Folgenden wird die maximale Beschleunigung für die beschriebene Bemessungssituation mit dem spektralen Lastmodell berechnet. Hierzu ist anzumerken, dass es sich bei der berechneten Beschleunigung um einen charakteristischern Wert im Sinne des Eurocodes-Konzepts handelt.

$$a_{max} = \psi\, k_{a,95\%} \sqrt{\frac{C\,\sigma_F^{\,2}}{m_i^{*\,2}}\, k_1 \xi^{k_2}} \qquad mit \quad \psi = 0{,}7 \qquad \text{Eq. 7-6}$$

$$a_{max} = 0{,}54 \approx a_{CC1} = 0{,}50 \; [m/s^2] \qquad \text{Eq. 7-7}$$

mit

C = 2,95

σ_F^2 = $1{,}2 \times 10^{-2} \times 108 = 1{,}30$ kN^2

$k_{a,95\%}$ = 3,92

k_1 = $-0{,}07 \times 1{,}42^2 + 0{,}6 \times 1{,}42 + 0{,}075 = 0{,}7859$

k_2 = $0{,}003 \times 1{,}42^2 - 0{,}04 \times 1{,}42 - 1 = -1{,}0508$

ξ = $0{,}085 / (2 \times \pi)$

$M = m^* = 80\ 500$ kg

Die berechnete maximale Beschleunigung ist hier ein wenig höher als die, die mit FE berechnet wurde. Jedoch wird bei beiden Verfahren die Anforderungen der höchsten Komfortklasse erfüllt.

7.3 Guarda-Fußgängerbrücke in Portugal

Die Guarda-Brücke, Bild 7-3, überspannt eine Stadtstraße und stellt die Verbindung des städtischen Randbereiches mit einer Schule und der Bahnstation her. Es handelt sich um eine Bogenbrücke mit gelenkig gelagerten Bogenfußpunkten. Der Bogen spannt über 90 m, besitzt eine Höhe von 18 m und trägt über schräg verlaufenden Seile das Brückendeck. Das Brückendeck von 123 m Länge wird an den Brückenenden zusätzlich jeweils durch 3 Stützen getragen, die vertikale und seitliche Verschiebungen verhindern. Die Konstruktion des Brückendecks besteht aus zwei Längsträgern im Abstand von 2,70 m, mit Querträgern alle 4 m, die Fertigbetonteilplatten mit einer Breite von 3 m (Gehwegbreite 2,0 m) tragen, siehe Bild 7-4.

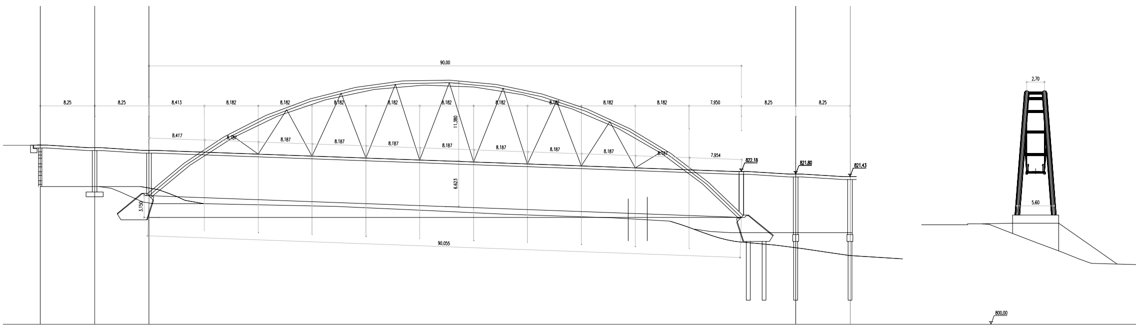


Bild 7-3: Seitliche Ansicht der Guarda-Brücke

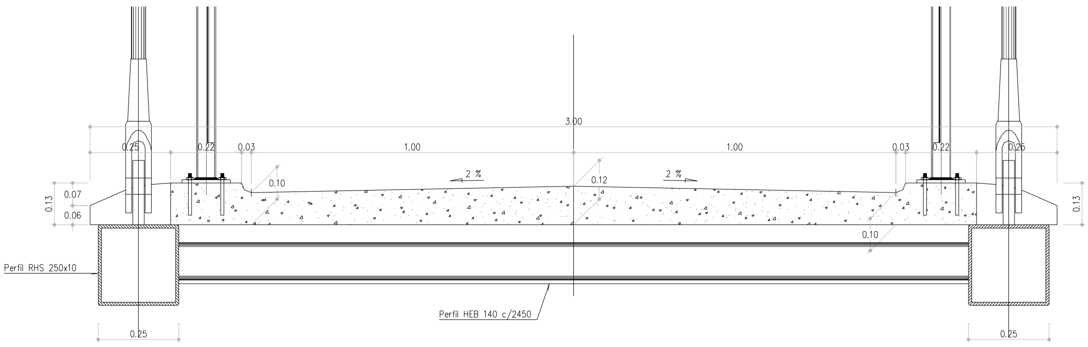


Bild 7-4: Querschnitt der Guarda-Brücke

Tabelle 7-4 gibt die ersten fünf Eigenfrequenzen an, die mit einem FE-Modell, das an Messergebnissen an der fertigen Brücke validiert wurde, berechnet wurden. Ebenfalls gibt die Tabelle die Schwingungsformen und die gemessenen Dämpfungen der einzelnen Moden an.

Tabelle 7-4: Eigenfrequenzen und modale Eigenschaften

Mode Nr.	Eigenfrequenz [Hz]	Gemessene Dämpfung ξ [%]	Merkmal der Schwingungsform
1	0,63	2,2	1. seitlich
2	1,24	1,7	2. seitlich
3	1,41	1,4	3. seitlich
4	2,33	0,8	1. vertikal
5	3,60	0,4	2. vertikal

Anhand der in dem Bemessungsleitfaden angegebenen Frequenzbereiche werden die ersten beiden Moden als kritisch für seitliche Schwingungen und die vierte Mode als kritisch für vertikale Schwingungen identifiziert. Die 5 Mode könnte für Anregungen in der zweiten Harmonischen kritisch sein. Im Rahmen dieses Beispiels werden nur die erste seitliche und die erste vertikale Mode untersucht. Die entsprechenden Eigenschaften stellt Tabelle 7-5 zusammen.

Tabelle 7-5: Eigenschaften der untersuchten Schwingungsmoden

Größe	Mode 1	Mode 4
Eigenfrequenz, f [Hz]	0,63	2,33
Belastete Fläche [m^2]	$S = L \times B = 123 \times 2 = 246$	
Modale Masse, m^*	82,5 t	130,7 t
Gesamtmasse	232,2 t	
Dämpfungsgrad, ξ [%]	0,6	0,6

Unter Anbetracht der Lage der Brücken (in Schulnähe) und obwohl die Brücke keine relevanten Stadtbereiche verbindet, sollten verschiedene Bemessungssituationen untersucht werden. Im vorliegenden Beispiel werden zwei Bemessungssituationen vorgestellt:

1. Die Einweihung der Brücke mit Verkehrklasse TC4 ($d = 1{,}0$ P/m^2) und minimalen Komfortanforderungen (CL3),
2. Pendelverkehr mit Verkehrsklassen (TC2, $d = 0{,}2$ P/m^2) und mittleren Komfortanforderungen (CL2)

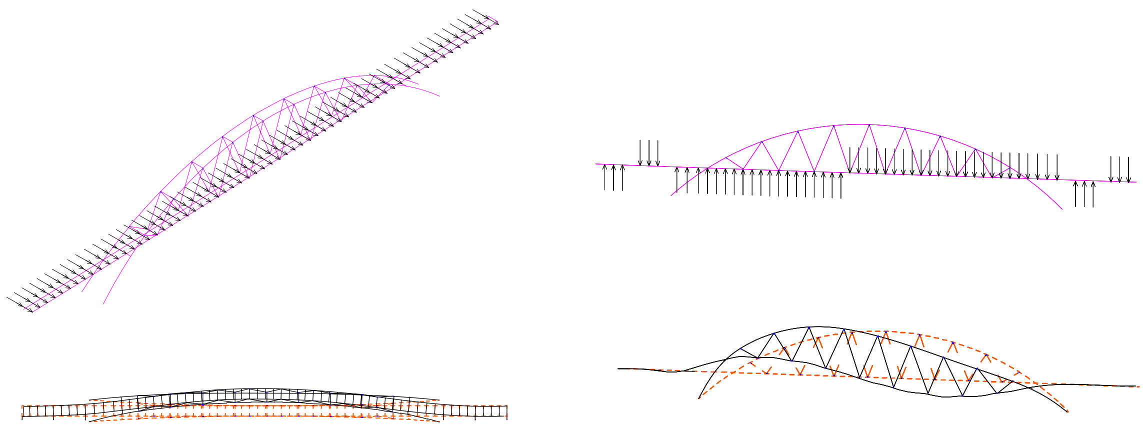
Obwohl bei den Messungen höhere Dämpfungen festgestellt wurden (siehe Tabelle 7.4), wird hier eine Dämpfung von 0,6 % angenommen, was der Annahme im Entwurfsstadium entspricht.

Die harmonischen Lastmodelle für Fußgängerströme werden anhand des Bemessungsleitfadens bestimmt und sind in Tabelle 7-6 für beide Bemessungsfälle angegeben. Es ist anzumerken, das zusätzliche Masse aus Fußgängern im Bemessungsfall 1 7,6 % der Brückenmasse beträgt und daher die Brückenfrequenz unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Masse neu zu berechnen wäre. Zur Vereinfachung wird hier aber auf diese zusätzliche Berechnung verzichtet.

Tabelle 7.6: Harmonische Lastmodelle für Fußgängerströme

	n ($S \times d$)	n'	ψ (M 1)	ψ (M 4)	$p_h(t)$ [N/m²] (M 1)	$p_v(t)$ [N/m²] (M 4)
Bemessungs-situation 1	246	0,118	1	0,54	4,13 cos(2π×0,63t)	17,84 cos(2π×2,33t)
Bemessungs-situation 2	49,2	0,023 9	1	0,54	0,835 cos(2π×0,63t)	3,61 cos(2π×2,33t)

Die Vorzeichen der Belastung werden entsprechend der Modalform angesetzt (Bild 7-5).



Mode 1: f = 0,63 Hz Mode 4: f = 2,33 Hz

Bild 7-5: Schematische Darstellung der harmonischen Lasten und Schwingungsformen

Die berechneten Maximalwerte der Beschleunigung werden in Tabelle 7-6 den akzeptierten Beschleunigungen gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Komfortanforderungen an die Brücke eingehalten werden. Allerdings überschreiten die seitlichen Beschleunigungen mit 0,67 m/s² deutlich den Grenzwert von 0,15 m/s² ab dem nach dem Bemessungsleitfaden mit dem seitlichen Synchronisationseffekt (lock-in) gerechnet werden muss. Außerdem ergibt die „Millenium-Bridge-Formel“, siehe Abschnitt 4.6, mit der die kritischen Personenzahl für seitlichen lock-in berechnet werden kann, eine Personenzahl von

$$N_L = \frac{8\pi\xi m * f}{k} = \frac{8 \times \pi \times 0{,}6 \times 10^{-2} \times 82{,}5 \times 10^{3} \times 0{,}63}{300} = 26{,}1\ \mathrm{P} \qquad \text{Eq. 7-8}$$

Diese 26,1 Fußgänger sind auf der äquivalenten Brückenlänge von 84 m zu verteilen, woraus sich eine kritische Personendichte von 0,16 P/m² ergibt, die deutlich geringer ist als die angenommen 1 P/m².

Aufgrund dieser Tatsache wurde in der Entwurfsphase ein Massedämpfer (TMD) eingeplant der eine zusätzliche Dämpfung 4% liefern sollte. Als Folge musste der Konstruktionsentwurf verstärkt werden, um die zusätzlichen Masse des TMD tragen zu können. Schließlich wurde an der fertig gestellten Brücke (ohne Dämpfer) eine Dämpfung von 2,2 % gemessen. Durch die höhere Dämpfung erhöhte sich die kritische Personendichte von 0,16 P/m^2 auf 0,6 P/m, so dass sich die Option ergab, auf den Einbau des Dämpfers zu verzichten.

Tabelle 7-6: Systemantworten auf die harmonische Anregung

Maximale Beschleunigung [m/s^2]	Mode 1 (seitlich)	Mode 4 (vertikal)	Akzeptierter Bereich (seitlich) [m/s^2]	Akzeptierter Bereich (vertikal) [m/s^2]
Bemessungssituation 1	0,67	1,11	0,30-0,80	1,0-2,5
Bemessungssituation 2	0,13	0,22	0,10-0,30	0,5-1,0

8 Literatur

[1] BS5400, Part 2, Appendix C, *Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges*. British Standards Institution, 1978

[2] DIN-Fachbericht 102, *Betonbrücken*. Deutsches Institut für Normung, 2003.

[3] ENV 1995-2, *Eurocode 5 - Design of timber structures – bridges*. European Committee for Standardization, 1997.

[4] *Guidelines for the design of footbridges*. fib bulletin 32, November 2005.

[5] EN 1990, *Eurocode 0 – Basis of structural design*. European Committee for Standardization, 2002.

[6] Charles, P.; Bui, V., *Transversal dynamic actions of pedestrians & Synchronisation*. Proceedings of Footbridge 2005 – 2nd International Conference, Venice 2005

[7] Schneider, M., *Ein Beitrag zu fußgängerinduzierten Brückenschwingungen*, Dissertation. Technische Universität München, 1991

[8] Maia, N. et al., *Theoretical and Experimental Modal Analysis*. Research Studies Press, UK, 1997.

[9] SETRA/AFGC, *Passerelles piétonnes – Evaluation du comportement vibratoire sous l'action des piétons (Footbridges – Assessment of dynamic behaviour under the action of pedestrians)*, Guidelines. Sétra, March 2006.

[10] Bachmann, H. and W. Ammann, *Vibrations in Structures Induced by Man and Machines*. IABSE Structural Engineering Documents, 1987. No. 3e.

[11] EN 1991-2, *Eurocode 1– Actions on structures, Part 2: Traffic loads on bridges*. European Committee for Standardization, 2002.

[12] EN 1995-2, *Eurocode 5– Design of timber structures, Part 2: Bridges*. European Committee for Standardization, 2003.

[13] Butz, C. et al., *Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimised design guidelines for steel foot bridges (SYNPEX)*, Project RFS-CR-03019, Final Report. RFCS, 2007.

[14] EN 1998-2, *Eurocode 8– Design of structures for earthquake resistance, Part 2: Bridges*. European Committee for Standardization, 2003.

[15] Nakamura, S. and Y. Fujino, *Lateral vibration on a pedestrian cable-stayed bridge.* IABSE, Structural Engineering International, 2002.

[16] Dallard, P., et al., *The London Millennium footbridge.* The Structural Engineer, 2001. 79/No 22.

[17] Caetano, E., Cunha, A. and Moutinho, C., *Implementation of passive devices for vibration control at Coimbra footbridge*. EVACES 2007, Porto, 2007.

[18] Collette, F.S., *Tuned Mass Dampers for a suspended structure of footbridges and meeting boxes.* Footbridge 2002, Paris, 2002.

[19] Hatanaka, A. and Y. Kwon, *Retrofit of footbridge for pedestrian induced vibration using compact tuned mass damper.* Footbridge 2002, Paris, 2002.

[20] Breukleman, B., et al., *Footbridge damping systems: a case study.* Footbridge 2002, Paris, 2002.

[21] Seiler, C., O. Fischer, and P. Huber, *Semi-active MR dampers in TMD's for vibration control of footbridges, Part 2: numerical analysis and practical realisation.* Footbridge 2002, Paris, 2002.

[22] Den Hartog, J.P., *Mechanical Vibrations.* McGraw Hill, New York, 1940.

[23] Moutinho, C.M., *Controlo passivo e activo de vibrações em pontes de peões*, MSc. Thesis. 1998, Universidade do Porto: Porto.

[24] Geres, R.R. and B.J. Vicjery, *Optimum Design of Pendulum-Type Tuned Mass Dampers.* The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2005(14): p. 353-368.

[25] Reiterer, M. and F. Ziegler, *Combined seismic activation of a SDOF-building with a passive TLCD attached*. 13th WCEE, Canada, 2004.

[26] Lamb, H., *Hydrodynamics.* The University Press, Cambridge, England, 1932.

[27] Fujino, Y. and L.M. Sun, *Vibration control by multiple tuned liquid dampers (MTLDs).* Journal of Structural Engineering, 1992. 119(12): p. 3482-3502.

[28] Sun, L.M., et al., *The properties of tuned liquid dampers using a TMD analogy.* Earthquake engineering and structural dynamics, 1995. 24: p. 967-976.

[29] Yu, J.-K., T. Wakahara, and D. Reed, *A non-linear numerical model of the tuned liquid damper.* Earthquake engineering and structural dynamics, 1999. 28: p. 671-686.

[30] Statistisches Bundesamt: http://www.destatis.de/basis/d/gesu/gesutab8.php, Mikrozensus 2004

[31] Živanović, S. et al., *Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review*. Journal of Sound and Vibration 279 (2005), pp. 1-79

[32] SETRA/AFGC, *Comportement Dynamique des Passerelles Piétonnes (Dynamic behaviour of footbridges)*, Guide (Draft). December 2004.

[33] Peeters B., *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*, Ph.D. Thesis. Katholieke Universiteit Leuven, 2000.

[34] Brincker R., Zhang L. and Andersen P., *Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition*, Procceedings of IMAC-XVIII, International Modal Analysis Conference, pp.625-630, San Antonio, Texas, USA, 2000.

[35] Van Overschee P., De Moor B., *Subspace Identification for Linear Systems: Theory-Implementation-Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996.

[36] Fujino Y., Pacheco B., Nakamura S. and Warnitchai P., *Synchronization of Human Walking Observed during Lateral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge.* Earthqauke Engineering and Structural Dynamics, Vol.22, pp.741-758, 1993.

[37] http://www.bwk.kuleuven.ac.be/bwm/macec/index.html

[38] http://www.svibs.com/

9 Anhang: Zusätzliche Lastmodelle

9.1 Lastmodelle für einzelne Fußgänger

Die durch einen Fußgänger drei-dimensional übertragenen Kräfte werden durch die Bewegung der Körpermasse und das Aufsetzen, Abrollen und Abstoßen der Füße bestimmt. Diese Kräfte werden Bodenkontaktkräfte genannt. Wenn die Kräfte durch Gehen eingetragen werden, dann entsteht eine im Wesentlichen periodische Anregung.

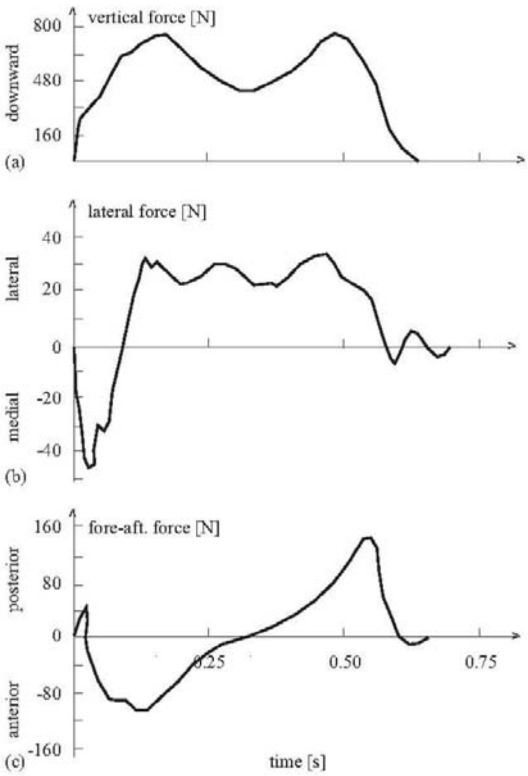
Bei gleichen physiologischen Eigenschaften gehen Menschen in der gleichen Frequenz. Die Schrittfrequenz wird aber durch die Motivation beim Gehen (Eile) und durch die Verkehrsdichte beeinflusst. Es hat sich gezeigt, dass Schrittfrequenzen im Bereich von 1,25 bis 2,3 Hz am häufigsten auftreten.

Im Gegensatz zum Laufen bleibt beim Gehen immer ein Fuß in Bodenkontakt. Die Bodenreaktionskräfte beider Füße treten zeitweise auch gleichzeitig auf und ergeben eine periodische Belastung, die sich örltich und zeitlich ändert.

Die Größe der Vertikal- und Längskräfte hängt im Wesentlichen vom Körpergewicht und der Schrittfrequenz ab. Die Periodizität wird durch die Schrittfrequenz bestimmt. Die seitlichen Kraftkomponenten werden durch die Schwerpunktverlagerung von Fuß zu Fuß hervorgerufen. Die seitlich schwingende Bewegung des Körpers verursacht dynamische Kräfte, die mit der halben Schrittfrequenz auftreten.

Das Gehen verursacht Vertikalkräfte mit einem schmetterlingsförmigen Zeitverlauf, der zwei auffallende Maxima besitzt. Das erste Maximum wird durch das Aufsetzen der Ferse verursacht, während das zweite auf das Abstoßen hervorgerufen wird. Die Maximalwerte steigen mit zunehmender Schrittfrequenz (siehe Bild 9-1 a)). Die horizontalen Lastanteile in Längs- und Querrichtung sind deutlich kleiner als die Vertikalkomponente. Die horizontale Kraftkomponente in Längsrichtung (x-Richtung) wird durch die Brems- und Beschleunigungsvorgänge bestimmt (vergleiche Bild 9-1 c)). Die seitliche Kraftkomponente (y-Richtung) wird durch die seitliche Verlagerung des Körperschwerpunktes verursacht. Diese Kraftrichtung unterliegt einer großen Streuung, weil sie vielen Einflüssen unterliegt. Zum Beispiel haben die Schuhe, der Stellwinkel der Füße, die Haltung des Oberkörpers, das Schwingen mit den Armen, die Form der Beine (O- oder X-Beine) und Art des Untergrundkontakts einen Einfluss. Im Gegensatz zu den Kräften in Längs- und Vertikalrichtung treten die seitlichen Kräfte mit der halben Schrittfrequenz auf (siehe Bild 9-1 b)).

Üblicherweise wird das Laufen und das Gehen zeitabhängig beschrieben. Die Beschreibung geht von der Annahme aus, dass beide Füße die gleichen Kräfte hervorrufen. Daher kann die Kraft periodisch durch Fourierreihen beschrieben werden, (siehe Bild 9-1).



$$F_{p,vert}(t) = P\left[1 + \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i,vert} sin(2\pi\, i\, f_s\, t - \varphi_i)\right] \quad \text{Eq. 9-1}$$

$$F_{p,lat}(t) = P \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i,lat} sin(\pi\, i\, f_s\, t - \varphi_i) \quad \text{Eq. 9-2}$$

$$F_{p,long}(t) = P \sum_{i=1}^{n} \alpha_{i,long} sin(2\pi\, i\, f_s\, t - \varphi_i) \quad \text{Eq. 9-3}$$

Bild 9-1: Typische Verläufe der Kräfte beim Gehen

Dabei ist:

$F_{p,\mathrm{vert}}$ die periodische Vertikalkraft durch Gehen oder Laufen

$F_{p,\mathrm{lat}}$ die periodische seitliche Kraft durch Gehen oder Laufen

$F_{p,\mathrm{long}}$ die periodische Längskraft durch Gehen oder Laufen

P [N] das Personengewicht

$\alpha_{i,\mathrm{vert}}$, $\alpha_{i,\mathrm{lat}}$, $\alpha_{i,\mathrm{long}}$ die Fourier-Koeffizienten der i-ten Harmonischen für vertikale , seitliche und Längskräfte, d.h. der dynamische Erhöhungsfaktor

f_s [Hz] die Schrittfrequenz

φ_i die Phasenverschiebung der i-ten Harmonischen

n die Anzahl der berücksichtigen Harmonischen

Die periodische Kraft verändert ihre Position: sie wandert mit einer Konstanten Geschwindigkeit über die Brücke. In dem Forschungsprojekt SYNPEX wurde die Abhängigkeit zwischen Gehgeschwindigkeit und Schrittfrequenz für den Frequenzbereich von 1,3 Hz bis 1,8 Hz bestimmt:

$$v_s = 1{,}271 f_s - 1 \quad \text{Eq. 9-4}$$

In einigen Normen (z.B. EN 1995 [12]) wird das Körpergewicht mit 700 N oder 800 N angegeben. Das mittlere Körpergewicht beträgt nach dem Deutschen Statistischen Bundesamt 74,4 kg [30].

Fourier-Koeffizienten bzw. Dynamische Erhöhungsfaktoren wurden durch viele Autoren ermittelt [31]. Weil die Bodenkontaktkräfte einer Vielzahl von Einflüssen unterliegen (z.B. Gehgeschwindigkeit, individuelle Körpereigenschaften, Schuhart), unterliegen die gemessenen Lastfaktoren Streuungen. Die Fourrier-Koeffizienten und Phasenverschiebungen einiger Autoren sind in Tabelle 9-1 zusammengestellt.

Tabelle 9-1: Fourier-Koeffizienten für Gehen und Laufen aus verschiedenen Quellen

Autoren	Fourier Koeffizienten / Phasenwinkel	Bemerkung	Bewegungsart und Lastrichtung
Blanchard et al.	α_1 = 0,257		Gehen – vertikal
Bachmann & Ammann	α_1 = 0,4 – 0,5; $\alpha_2 = \alpha_3$ = 0,1	for f_p = 2,0 - 2,4 Hz	Gehen – vertikal
Schulze	α_1 = 0,37; α_2 = 0,10; α_3 = 0,12; α_4 = 0,04; α_5 = 0,015	for f_p = 2,0 Hz	Gehen – vertikal
Bachmann et al.	α_1 = 0,4/0,5; $\alpha_2 = \alpha_3$ = 0,1 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ = 0,1 $\alpha_{1/2}$ = 0,1; α_1 = 0,2; α_2 = 0,1 α_1 = 1,6; α_2 = 0,7; α_3 = 0,3 $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$	f_p = 2,0/2,4 Hz f_p = 2,0 Hz f_p = 2,0 Hz f_p = 2,0 – 3,0 Hz	Gehen – vertikal Gehen – seitlich Gehen – längs Laufen – vertikal Gehen – vertikal & seitlich
Kerr	α_1, α_2 = 0,07; α_3 = 0,2	α_1 ist frequenzabhängig	Gehen – vertikal
Young	α_1 = 0,37 (f_p – 0,95) ≤ 0,5 α_2 = 0,054 + 0,0088 f_p α_3 = 0,026 + 0,015 f_p α_4 = 0,01 + 0,0204 f_p	Mittelwerte der Fourier Koeffizienten	Gehen – vertikal
Charles & Hoorpah	α_1 = 0,4 α_1 = 0,05 α_1 = 0,2		Gehen – vertikal Gehen – seitlich Gehen – längs
EC5, DIN1074	α_1 = 0,4; α_2 = 0,2 $\alpha_1 = \alpha_2$ = 0,1 α_1 = 1,2		Gehen – vertikal Gehen – seitlich Jogging – vertikal

Autoren	Fourier Koeffizienten / Phasenwinkel	Bemerkung	Bewegungsart und Lastrichtung
Synpex findings	$a_1 = 0{,}0115 f_s^2 + 0{,}2803\, f_s - 0{,}2902$ $\varphi_1 = 0$ $a_2 = 0{,}0669 f_s^2 + 0{,}1067\, f_s - 0{,}0417$ $\varphi_2 = -99{,}76 f_s^2 + 478{,}92\, f_s - 387{,}8$ [°] $a_3 = 0{,}0247\, f_s^2 + 0{,}1149\, f_s - 0{,}1518$ If $f_s < 2{,}0$ Hz $\varphi_3 = -150{,}88\, f_s^3 + 819{,}65\, f_s^2 - 1431{,}35\, f_s + 811{,}93$ [°] If $f_s >= 2{,}0$ Hz $\varphi_3 = 813{,}12\, f_s^3 - 5357{,}6\, f_s^2 + 11726\, f_s - 8505{,}9$ [°] $a_4 = -0{,}0039\, f_s^2 + 0{,}0285\, f_s - 0{,}0082$ $\varphi_4 = 34{,}19\, f_s - 65{,}14$ [°]	Fourier Koeffizienten und Phasenwinkel des Schritt-für-Schritt-Modells, das die mittleren Bodenreaktionskräfte abbildet	Gehen - vertikal

9.2 Lastmodell für Jogger

Die Bodenkontaktkräfte beim Laufen zeichnen sich dadurch aus, dass es eine Phase gibt, in der kein Fuß den Boden berührt. Im Vergleich zum Gehen ist beim Laufen der individuelle Einfluss durch Laufweise und Schuhe größer. Der Zeitverlauf der vertikalen Belastung besitzt nur ein Maximum und ist durch das steile Ansteigen und Abfallen der Kurve gekennzeichnet, siehe Bild 9-2.

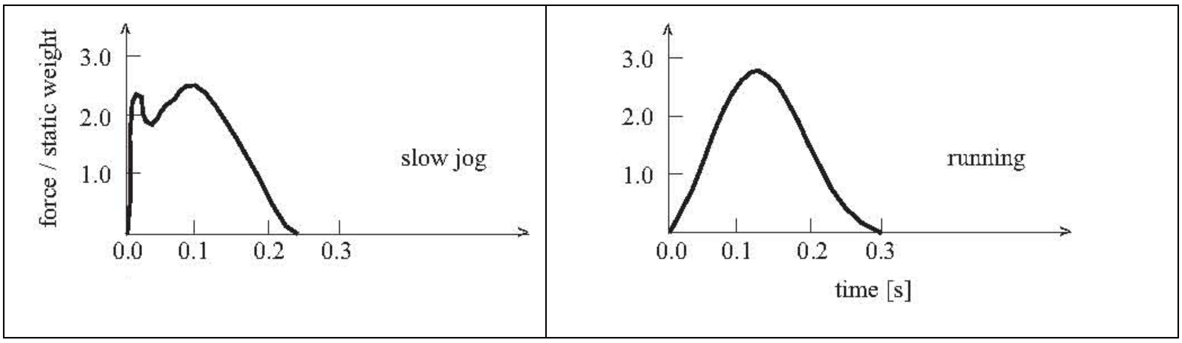


Bild 9-2: Typische Kraftverläufe für langsames Joggen und Laufen [1]

Das vorgeschlagene Lastmodell besteht aus einer Einzellast $P(t,v)$, die mit einer bestimmten Geschwindigkeit v des Joggers über die Brücke wandert. Das ist der Grund, warum dieses Modell mit den verbreiteten Computerprogrammen so schwer umzusetzen ist und die Anwendung spezialisierter Software (wie z.B. ANSYS, DYNACS) erfordert.

Die Einzellast wird wie folgt berechnet:

$$P(t,v) = P \times cos(2\pi\, ft) \times n' \times \psi \qquad \text{Eq. 9-5}$$

Dabei ist:

$P \times \cos(2\pi f t)$ die harmonische Last durch einen einzelnen Läufer,

f die untersuchte Eigenfrequenz,

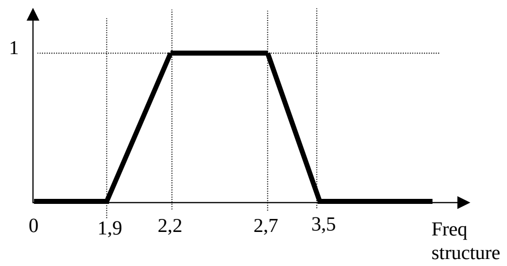
n' die äquivalente Anzahl von Läufern auf der belasteten Fläche,

S die Größe der belasteten Fläche,

ψ ein Abminderungsfaktor, durch den die Möglichkeit abgebildet wird, dass die Schrittfrequenz mit der Brückenfrequenz zusammen fällt.

Tabelle 9-2 gibt die Last *P* einer Einzelperson, die äquivalente Personenzahl und den Abminderungsfaktor ψ an.

Tabelle 9-2: Parameter für Jogger [32]

<table>
<tr><th colspan="3">P [N]</th><th rowspan="3">n′ = n [ ]</th></tr>
<tr><th>Vertikal</th><th>Längs</th><th>Seitlich</th></tr>
<tr><td>1250</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><th colspan="4">Abminderungsfaktor für die Vertikale ψ</th></tr>
<tr><td colspan="4">
</td></tr>
</table>

Nach [32] kann angenommen werden, dass eine Gruppe aus *n* Joggern in Frequenz und Phase perfekt mit der Brücke synchronisiert. Die Jogger laufen mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s über die Brücke. Es erscheint aber in vielen Fällen als ausreichend, die Last $P(t,v=0)$ am Ort der maximalen Amplitude anzusetzen.

Augenscheinlich existieren keine Messungen horizontaler Kraftkomponenten beim Laufen. Trotzdem erscheint es sinnvoll, dass die seitliche Komponente klein ist und Komponente in Längsrichtung vernachlässigt werden können.

ANMERKUNG: Aus der Bemessungshilfe von SETRA/AFGC [8] wurde dieser Lastfall gestrichen, weil er als unrelevant angesehen wurde.

9.3 Mutwillige Schwingungsanregung

Es ist möglich, dass Leute versuchen, durch synchrones Hüpfen, Wippen (in den Knien), seitliches Schwingen am Geländer oder durch Schwingen von Seile, die Brücke in Resonanz aufzuschaukeln. Eine gering gedämpfte Brücke kann zu großen Amplituden angeregt werden, die auch zu Beanspruchungen bis an die Tragfähigkeit führen.

Die beim Hüpfen eingetragenen Last ist zwar höher als die beim Wippen, jedoch ist die Synchronisation mit der Brücke beim Hüfen sehr gering. Beim Wippen in den Knien bleibt die Person die ganze Zeit mit der Brücke in Berührung und kann daher leichter mit ihr synchronisieren. Selbst wenn einige Personen versuchen, zusammen durch Hüpfen, die Brücke anzuregen, fällt es ihnen schwer sich untereinander zu synchronisieren. Hier ist das Wippen die effektivere Anregung zumal sich mehrere Personen über die Arme den Takt gut vermitteln können. Das kann das Ergebnis nicht linear mit der Personenzahl gesteigert werden, weil, wie Untersuchungen gezeigt haben, die Synchronisation mit wachsender Personenzahl abnimmt.

Es ist wichtig, festzuhalten, dass es sich bei der mutwilligen Schwingungsanregung eher nur einen außergewöhnlichen Grenzzustand der Tragfähigkeit handelt als um ein Ermüdungs- oder Komfortproblem. Mit steigender Amplitude nimmt auch die Dämpfung zu und damit die Zeitdauer über die die Brücke synchron angeregt werden muss. Es ist nicht zu erwarten, dass die für die mutwillige synchronisierte Anregung die Ausdauer und dauerhafte Konzentration, die für eine gute Synchronisation erforderlich ist, aufgebracht wird, um ein Ermüdungsproblem zu verursachen. Die mutwillige Anregung wird beendet, wenn die Schwingungsamplituden nicht mehr zu nehmen oder die Personen ermüden.