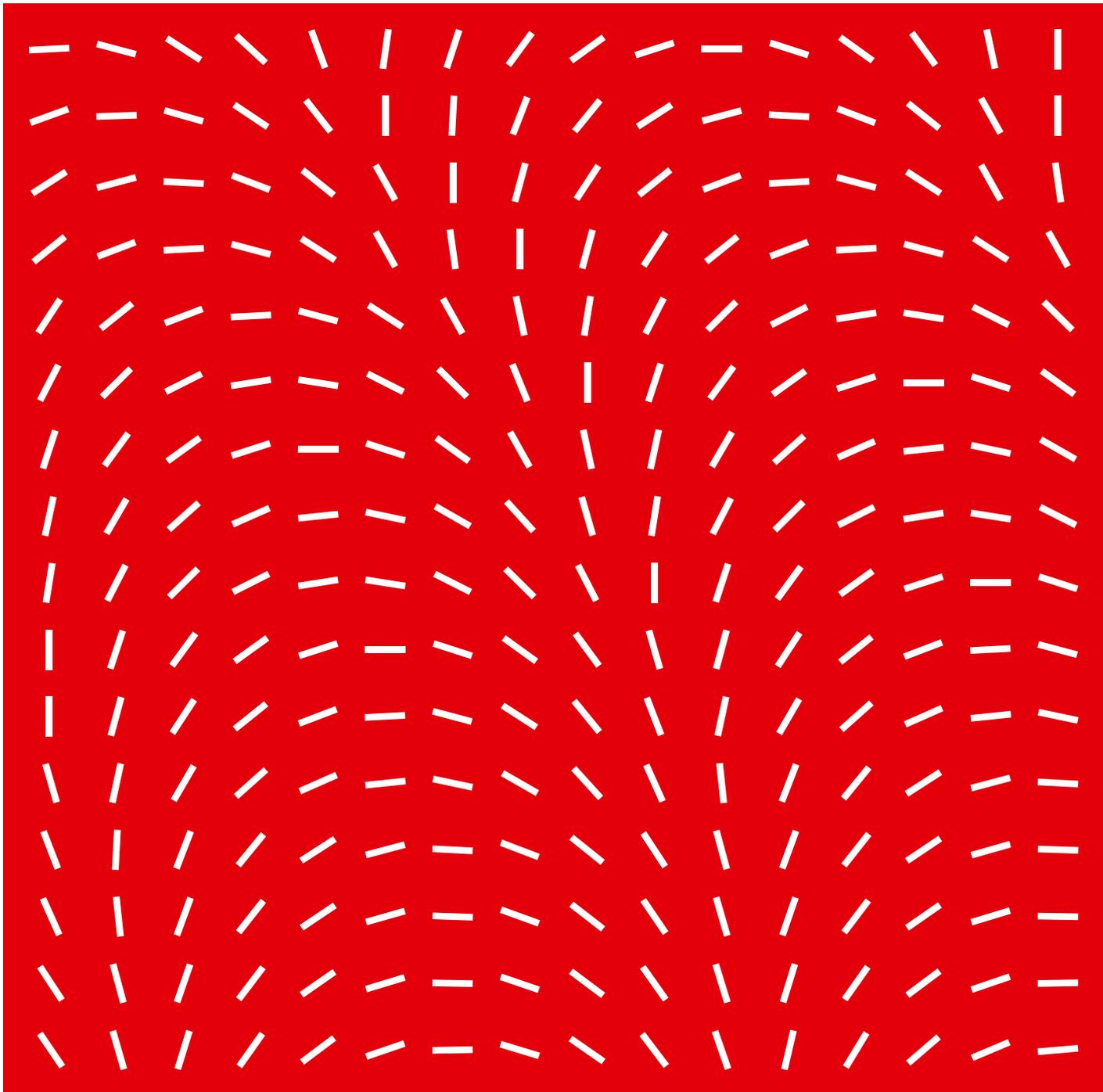


Bemessung von Fussgängerbrücken für dynamische Lasten



9. Bemessung von Fussgängerbrücken für dynamische Lasten

A. Ziegler, Dr. sc. techn., ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich

9.1 Einleitung

Mit dem extremen Schwingungsverhalten der Millenium-Brücke in London ist die Schwingungsproblematik von schlanken Fussgängerbrücken einem breiten Publikum bewusst geworden. Das Erstaunen über dieses „eigenartige“ Verhalten war auch innerhalb der Fachwelt recht gross und löste eine intensive Forschungstätigkeit aus. Zahlreiche Konferenzen und Symposien wurden veranstaltet, an denen neue Forschungsergebnisse präsentiert wurden. Trotz alledem darf man nicht vergessen, dass sich die Physik in den letzten Jahren nicht verändert hat. Dass schlanke Brücken zu Resonanzschwingungen neigen, hat man schon seit Jahrzehnten gewusst und hat die Brücken entsprechend konzipiert. Allerdings hat man das mögliche Ausmass von Horizontalschwingungen stark unterschätzt. Die neuen Forschungsarbeiten haben das Verständnis für die Schwingungsphänomene bei schlanken Brücken enorm gefördert. Die Grundprinzipien der dynamischen Berechnung bleiben aber bestehen. Aufbauend auf diesen Grundprinzipien soll im Folgenden die Bemessung von Fussgängerbrücken für dynamische Lasten, und zwar für von Menschen induzierte Lasten, erläutert werden. Windlasten, die selbstverständlich auch immer zu berücksichtigen sind, werden nicht besprochen. Das Hauptgewicht soll dabei nicht so sehr auf die Erläuterung raffinierter Bemessungsformeln gelegt werden, sondern vielmehr auf die Darstellung der wesentlichen Zusammenhänge, damit wir mit einfachen Methoden, sei es mit Handrechnungen oder FE-Modellen, eine zuverlässige Bemessung und Beurteilung erreichen.

9.2 Schwingungsverhalten von Fussgängerbrücken

Fussgängerbrücken schaffen es immer wieder in die Schlagzeilen. Zum Teil ist das ja sicher erwünscht, denn Fussgängerbrücken sind nicht nur Verbindungswege, um von A nach B zu gelangen, sondern auch architektonische Kunstwerke. Wenn aber die Berühmtheit einer Fussgängerbrücke primär von den starken Schwingungen ausgeht, so ist das wohl nicht ganz im Sinne des Erfinders. Berühmtestes Beispiel ist die Millenium-Brücke in London. Mit einer Hauptspannweite von 144 m und einer ganz neuartigen, filigranen Tragkonstruktionen gilt sie zu recht als Wunderwerk der Brückenbaukunst. Allerdings musste sie wegen extern starken Horizontalschwingungen bereits am Tag der Eröffnungsfeierlichkeiten geschlossen werden. Erst ein Jahr später, nach dem Einbau von massiven Schwingungstilgern, konnte sie wieder geöffnet werden.

Auch die Dreiländerbrücke bei Weil am Rhein mit einer freien Bogenspannweite von 230 m ist ein imposantes und elegantes Beispiel moderner Brückenbaukunst. Es scheint, dass Eröffnungsfeierlichkeiten dem Wohl einer Fussgängerbrücke nicht sonderlich zuträglich sind. Es wurden maximale horizontale Schwingungen von bis zu 1.4 m/s^2 gemessen, was bei vielen Menschen nicht unbedingt das Sicherheitsgefühl erhöht. Gerüchte besagen, dass diese extremen Schwingungen nur deshalb aufgetreten sind, weil auf der französischen Seite Freibier serviert wurde. Bei normaler Nutzung verhält sich die Brücke absolut harmlos.

Fussgängerbrücken müssen schwingen. Fussgängerbrücken, die so steif ausgebildet sind, dass man absolut keine Schwingungen spürt, haben entweder sehr kurze Spannweiten oder sind nicht sonderlich elegant. Das Hauptziel des projektierenden Ingenieurs kann nicht sein, die Brücke so zu versteifen bis sie jegliche Eleganz eingebüsst hat, sondern die Schwingungen gezielt zu kontrollieren. Die Schwingungen müssen sich in einem Rahmen bewegen, in dem die Tragsicherheit absolut gewährleistet ist und bei dem sich der Benutzer der Brücke immer noch wohl fühlt. Hierzu muss der Ingenieur einerseits wissen mit welchen Faktoren er die Schwingungen beeinflussen kann, z.B. durch Verschiebungen in den Eigenfrequenzen oder durch den Einbau von Schwingungstilgern. Andererseits muss er die Grenzen der menschlichen Akzeptanz kennen. Er muss

wissen, welche Schwingungen – im Freien – als noch angenehm gelten, welche gerade noch toleriert werden und bei welchen Schwingungen Angstgefühle aufkommen.



Bild 9.1a Dreiländerbrücke / Weil am Rhein



Bild 9.1b Millenium Bridge / London



Bild 9.1c Passerella sulla Verzasca (Tenero / Locarno)



Bild 9.1d Aaresteg / Solothurn

Das Schwingungsverhalten einer Fussgängerbrücke ist ein komplexes Zusammenspiel aller beteiligten Komponenten. Da aber die stärksten Schwingungen in der Regel durch die ersten paar Eigenformen verursacht werden, können wir die wichtigsten Parameter anhand eines einfachen Modells herleiten. Handelt es sich bei der Brücke im Wesentlichen um einen „einfachen Balken“ wie in Bild 9.2a, so können wir die dynamischen Kennwerte mit Hilfe des Ein-Massen-Schwinger-Modells herleiten (Bild 9.2b). Auch bei komplexen Strukturen lässt sich häufig eine Reduktion auf den „einfachen Balken“ bewerkstelligen, sodass das Ein-Massen-Schwinger-Modell für überschlagsmässige Berechnungen durchaus verwendet werden kann. Selbstverständlich wird man genauere Berechnungen mit dynamischen FE-Modellen folgen lassen, doch das Grundverständnis für das dynamische Verhalten muss auf dem einfachen Modell der Handrechnung beruhen.

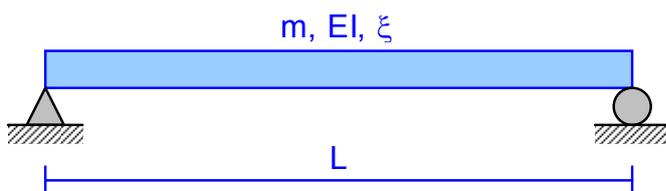


Bild 9.2a Idealisierung als einfacher Balken

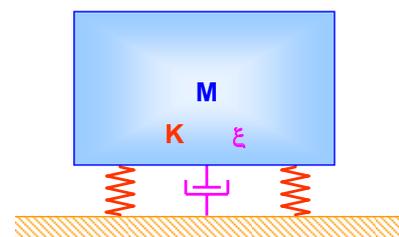


Bild 9.2b Idealisierung als 1-M-Schwinger

Der Zusammenhang zwischen der Eigenfrequenz des einfachen Balkens und dem Ein-Massen-Schwinger ist gegeben durch:

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

f = Grundfrequenz
 m = Masse pro Einheitslänge des Balkens
 L = Spannweite
 E = Elastizitätsmodul
 I = Trägheitsmoment

Die wichtigsten Parameter unserer idealisierten Brücke sind somit die Spannweite, die Masse, die Steifigkeit und die Dämpfung. Aus diesen Größen lässt sich ein äquivalenter Ein-Massen-Schwinger bilden, mit dem wir die wichtigsten Aspekte des dynamischen Verhaltens unserer Fussgängerbrücke herleiten können.

Die Gleichgewichtsbetrachtung am Ein-Massen-Schwinger führt zur Bewegungsgleichung:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = P_0 \sin \bar{\omega}t \tag{9.1}$$

wobei mit M die Masse, mit C die Dämpfungskonstante und mit K die Federsteifigkeit bezeichnet wird. Die Belastung wird nicht als allgemeine Zeitfunktion, sondern als harmonische Belastung mit einer Winkelgeschwindigkeit (Kreisfrequenz) $\bar{\omega}$ eingeführt. Für eine solche Belastung lässt sich die maximale Amplitude x_{\max} angeben als:

$$x_{\max} = \frac{P_0}{K} \sqrt{\frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \tag{9.2}$$

wobei mit ξ die Dämpfung und mit β das Verhältnis zwischen der Erregerfrequenz $\bar{\omega}$ und der Eigenfrequenz ω bezeichnet wird. Für den uns besonders interessierenden Fall der Resonanz, d.h. wenn die Anregung durch die Fussgänger im Gleichtakt mit der Eigenschwingung der Brücke ist, vereinfacht sich Gl. (9.2) zu:

$$x_{\max, \beta=1} = \frac{P_0}{K} \frac{1}{2\xi} \tag{9.3}$$

Mit einigen Umformungen, die in Kapitel 9.4 erläutert werden, erhalten wir aus Gl. (9.3) einen Ausdruck für die maximale Beschleunigung:

$$a_{\max, \beta=1} = \frac{P_0}{M} \frac{1}{2\xi} \tag{9.4}$$

d.h. die maximale Schwingungsamplitude im Falle von Resonanz ist proportional zur Kraft P_0 und umgekehrt proportional zur Dämpfung ξ . Die Wegamplitude hängt direkt mit $1/K$ und die Beschleunigungsamplitude mit $1/M$ zusammen.

Die wichtigsten Parameter für das dynamische Verhalten einer Fussgängerbrücke sind somit die Spannweite L, die Dämpfung ξ , die Steifigkeit (EI bzw. K), die Masse (m bzw. M) und die dynamische Belastung P_0 .

Der Zusammenhang zwischen der Eigenfrequenz und der Spannweite, der für den einfachen Balken (ohne Veränderung der Steifigkeit und der spezifischen Masse) durch die Funktion $f = K L^{-2}$ gegeben ist, lässt sich wie in Bild 9.3 darstellen. Daraus ist ersichtlich, dass ab einer Spannweite von 20 m mit Eigenfrequenzen im Bereich von 1.5 bis 3 Hz zu rechnen ist, sodass man bei solchen Brücken – wie wir in Kapitel 9.3 noch ausführlich zeigen werden – immer im kritischen Bereich liegt.

Der Einfluss der Dämpfung ist aus Gl. (9.4) leicht ersichtlich. So hat eine Betonstruktur mit einer Dämpfung von z.B. 2 % eine dynamische Verstärkung von 25. Eine Stahlkonstruktion hingegen mit einer Dämpfung von z.B. 0.4 % wird einen Verstärkungsfaktor von 125 aufweisen. Die Dämpfung hat neben der Spannweite (bzw. der Eigenfrequenz) den grössten Einfluss auf das Schwingverhalten. Da sie – im Gegensatz zur Eigenfrequenz – nicht genau vorausberechnet werden kann, bildet sie den grössten Unsicherheitsfaktor bei der Berechnung der Schwingungen einer Fussgängerbrücke. In Bild 9.4 sind die Dämpfungswerte und die zugehörigen maximalen Beschleunigungen für verschiedene Brücken dargestellt. Man erkennt leicht, dass die Betonbrücken, mit Dämpfungswerten von 0.5 % bis 2 % wesentlich geringere Schwingungsamplituden aufweisen als Stahl oder Stahl-Verbund-Konstruktionen. Wie wir weiter unten sehen werden ist dies kein grundsätzlicher Nachteil, sofern die erforderlichen Massnahmen zur Reduktion der Schwingungen getroffen werden.

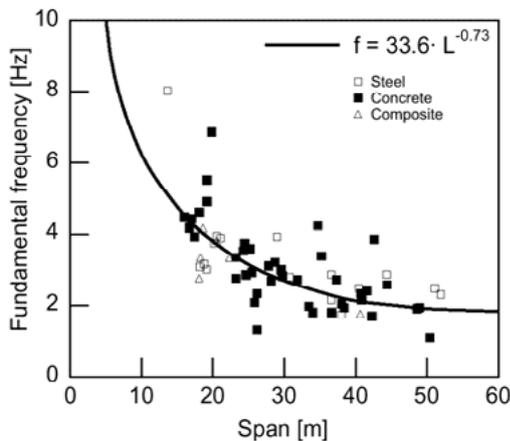


Bild 9.3 Zusammenhang zwischen Spannweite und Eigenfrequenz (aus [1])

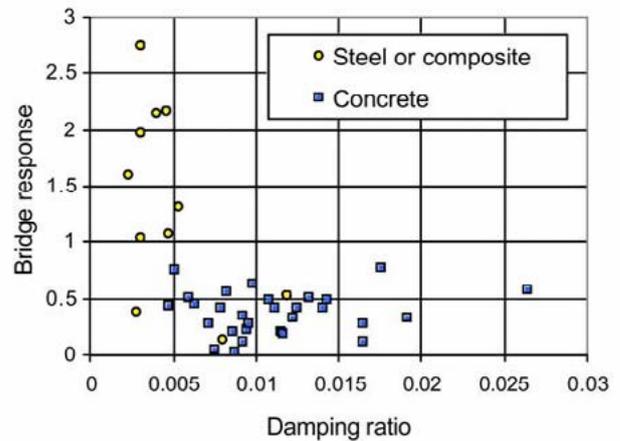


Bild 9.4 Dämpfung und maximaler Schwingung (in m/s^2) für verschiedene Stahl- und Betonbrücken (aus [2])

In Tabelle 9.1 sind durchschnittliche Dämpfungswerte für verschiedene Konstruktionstypen zusammengestellt (aus [1]).

Tab 9.1 Dämpfungswerte für verschiedene Konstruktionstypen

Typ	Mittelwert
Stahlbeton	1.3 %
Spannbeton	1.0 %
Verbund Stahl-Beton	0.6 %
Stahl	0.4 %

9.3 Schwingungsanregung durch Menschen

Die dynamische Anregung einer Fussgängerbrücke durch Menschen kommt ganz trivial dadurch zustande, dass wir unsere Füsse in einem regelmässigen Rhythmus aufsetzen, sei es beim gemütlichen Spazieren, beim Rennen oder beim Hüpfen. Das Faszinierende daran ist, dass dabei Phänomene auftreten, die man nicht so ohne weiteres erwarten würde. Trifft der Rhythmus von vier joggenden Sportlern gerade die Eigenfrequenz der Brücke, so beginnt sie plötzlich wild zu schwingen, was zwar nicht für die Sportler selbst aber für die gemütlich spazierenden Personen sehr beängstigend sein kann. Das gleiche Phänomen kann auch auftreten, wenn die Sportler die doppelte Eigenfrequenz der Brücke treffen. Ein ähnliches Phänomen – allerdings nicht in vertika-

ler Richtung sondern in horizontaler Brückenquerrichtung – kann sich einstellen, wenn eine grosse Menschenmenge über eine Brücke spaziert. Die Brücke beginnt langsam hin- und her zu schwingen. Um den sicheren Stand nicht zu verlieren, reagieren nun die Leute unbewusst mit einem breiten Gang („Seemannsgang“). Aber dadurch verstärkt sich die horizontale Anregung nur noch mehr und da alle Leute durch die Schwingung der Brücke synchronisiert sind, kann sich eine enorme Schwingung aufbauen.

9.3.1 Vertikale Anregung

In Bild 9.5 ist die idealisierte Lastzeitfunktion beim Gehen dargestellt. Jeder Fuss erzeugt eine kurzzeitige Belastung, die für beide Füße zusammen eine etwa sinusförmige Belastungskurve mit einem konstanten Anteil ergibt. Der konstante Anteil entspricht dem Eigengewicht der Person. Die Amplitude der harmonischen Anregung hängt von deren Temperament oder von der Eleganz des Ganges ab.

Beim Gehen bleibt der Kontakt zwischen Person und Boden stets bestehen. Beim Rennen und beim Hüpfen hingegen löst sich der Kontakt kurzzeitig und es entsteht eine Belastungskurve wie sie in Bild 9.6 dargestellt ist. Sie entspricht nun vielmehr einer Serie von sinusförmigen Impulsen unterbrochen durch Perioden, in denen keine Last wirkt.

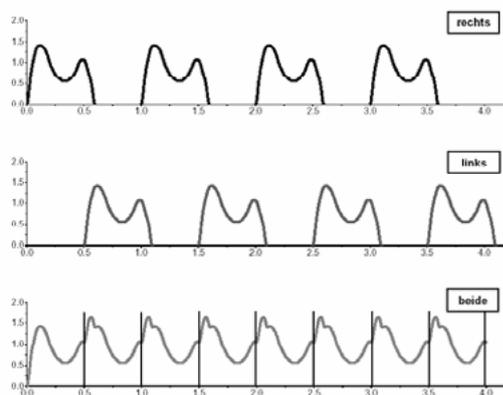


Bild 9.5 Idealisierter Lastzeitverlauf für Gehen mit Schritt-
frequenz von 2 Hz (aus [3])

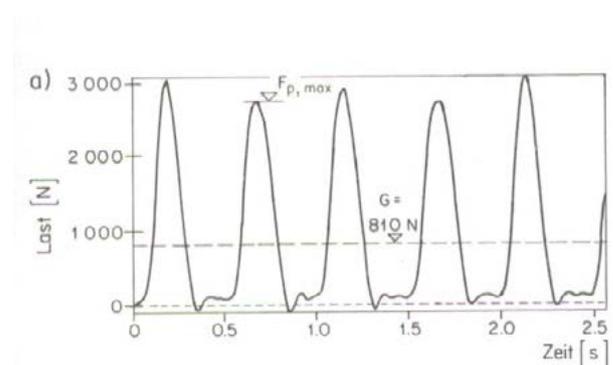


Bild 9.6 Lastzeitverlauf für eine hüpfende Person (aus [1])

Die Schrittfrequenz beim Gehen liegt zwischen 1.5 Hz und 2.5 Hz, wobei scheinbar signifikante regionale Unterschiede vorliegen. Böse Zungen behaupten, dass sich die Gemütlichkeit einer Region umgekehrt proportional zur durchschnittlichen Schrittfrequenz verhält. Beim Rennen und beim Hüpfen erreichen wir höhere Schrittfrequenzen mit Werten zwischen 2.0 Hz und 3.5 Hz. Höhere Frequenzen sind aus physiologischen Gründen nicht mehr realisierbar, zumindest nicht über längere Zeit.

9.3.2 Horizontale Anregung

Die horizontale Anregung entsteht durch die minimalen Querbewegungen des Körpers einer gehenden oder rennenden Person. Durch das Aufsetzen des linken und dann des rechten Fusses entsteht eine mehr oder weniger sinusförmige Last-Zeit-Funktion in Brücken-Querrichtung mit einer Frequenz, die der halben Schrittfrequenz entspricht. Dementsprechend liegen die beim normalen Gehen erzeugten Frequenzen in Querrichtung zwischen 0.75 Hz und 1.25 Hz, beim Rennen zwischen 1.0 Hz und 1.75 Hz.

Während bei der vertikalen Anregung die Kraftamplitude mit zunehmender Schrittfrequenz steigt, verhält sich die Kraftentwicklung bei der horizontalen Anregung ganz anders. Jede Person erzeugt beim Gehen - sozusagen wie ein umgekehrtes Pendel - eine kleine Horizontalkraft F_h .

Im Normalfall, d.h. bei einer ruhigen Brücke, ist diese Kraft F_h sehr klein. Falls die Personen auf der Brücke nicht im Gleichschritt gehen, und davon kann man in der Regel ausgehen, bleibt auch die gesamte Horizontalkraft relativ klein. Allerdings regt sie die Brücke bereits jetzt zu minimalen Horizontalschwingungen an, die allerdings niemand spürt. Ab einer bestimmten Schwingstärke (ab ca. 1 mm/s) beginnen wir die Horizontalschwingung zu spüren und reagieren unbewusst mit einem „Seemannsgang“. Durch dieses breitbeinige Gehen verstärken wir aber die Horizontalkraft um ein Mehrfaches und da dies alle Personen auf der Brücke ebenfalls tun (synchronisiert durch die Brückenschwingung), ergibt sich eine enorme Querschwingung.

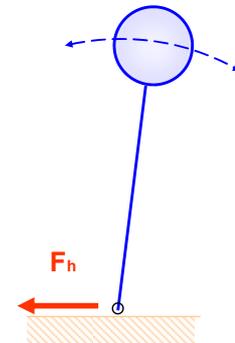


Bild 9.7 Horizontalkraft F_h beim umgekehrten Pendel

9.3.3 Synchronisation und räumliche Verteilung

Während die Anregung durch eine Person recht gut bekannt ist, sind bei der Anregung durch mehrere Personen noch viele Fragen offen. Dies liegt nicht nur daran, dass die dazu erforderlichen Untersuchungen sehr aufwändig sind, sondern an der inhärenten Variabilität der Ergebnisse solcher Untersuchungen. Bei vertikaler Anregung durch Hüpfen lässt sich – mit geeignetem Taktgeber (z.B. Musik) und innerhalb eines vernünftigen Frequenzbereichs – eine grosse Anzahl von Menschen problemlos synchronisieren. Dies haben die Schwingungsprobleme bei Fussballstadien genügend bewiesen. Bei Fussgängerbrücken ist diese Art von Synchronisation doch eher die Ausnahme. Viel häufiger kommt die Synchronisation durch eine gemeinschaftliche sportliche Betätigung (Joggen) oder die mutwillige Anregung durch einige wenige Personen vor. Bild 9.8 zeigt die Extremwerte der Synchronisation, d.h. den Fall der perfekten Synchronisation und den Fall ohne Synchronisation. Dabei ist dem Einfluss der räumlichen Verteilung bereits Rechnung getragen, indem bei einer Belegung mit 30 Personen nur noch 60 % der Wirkung angenommen wird.

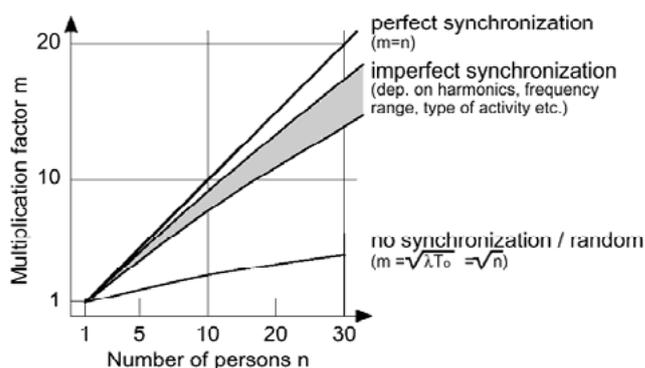


Bild 9.8 Synchronisation bei vertikaler Brückenanregung (aus [1])

9.3.4 Kritische Frequenzen

Die kritischen Frequenzen für eine Fussgängerbrücke sind somit gegeben durch die Gehgewohnheiten der Menschen und sind begrenzt durch die Möglichkeiten unseres Bewegungsapparates. Gehen und Rennen findet im Allgemeinen zwischen 1.5 Hz und 3 Hz statt. Dementsprechend liegen die kritischen Grenzen für die vertikale Anregung zwischen 1.5 Hz und 3.0 Hz für die 1. harmonische und zwischen 3 Hz und 6 Hz für die 2. harmonische Schwingung. Für die Querschwingung der Brücke liegen die kritischen Frequenzen zwischen 0.75 und 1.5 Hz, wobei die obere Grenze von 1.5 Hz doch eher theoretische Natur ist, da ein schnelles Joggen im Seemannsgang doch eher die Ausnahme darstellen dürfte.

Viel Platz für eine „schwingungsfreie“ Fussgängerbrücke bleibt im Frequenzspektrum offensichtlich nicht, es sei denn wir weichen in den steifen, ästhetisch nicht unbedingt überzeugenden Bereich über 6 Hz aus. Oder wir greifen auf schwingungsmindernde Massnahmen wie Materialien mit höherer Dämpfung oder auf Schwingungstilger zurück.

9.3.5 Unterschiede zwischen vertikaler und horizontaler Anregung

Zwischen der vertikalen und der horizontalen Anregung einer Fussgängerbrücke bestehen – wie bereits angesprochen – einige markante Unterschiede. Zum ersten ist die Anregungsfrequenz bei der horizontalen Anregung halb so hoch wie bei der vertikalen. Der zweite, etwas weniger bekannte Unterschied liegt im Vorhandensein bzw. im Fehlen einer oberen Begrenzung. Wird eine Brücke vertikal durch Gehen oder Rennen angeregt, so steigt die Schwingungsamplitude langsam immer höher bis sich ab einer gewissen Schwingstärke keine höheren Amplituden erreichen lassen, da die schwingende Brücke ein Gehen oder Rennen mit der gleichen Schrittfrequenz verunmöglicht. Die Grenze scheint bei ca. 1.2 m/s^2 , d.h. eindeutig im nicht komfortablen Bereich, zu liegen (aus [6]). Zudem müssen sich die im Gleichschritt gehenden oder rennenden Personen konzentrieren, um nicht aus dem Takt zu fallen.

Bei der Anregung in Querrichtung liegen die Verhältnisse anders: Eine grössere Menschenmenge mag problemlos, ohne stärkere Querschwingungen wahrzunehmen, auf der Brücke spazieren. Die Brücke schwingt in diesem Zustand zwar bereits in Querrichtung, doch da der Mensch auf Querschwingungen weniger empfindlich reagiert und horizontale Schwingungen unter 1 mm/s bei 1 Hz gar nicht wahrnimmt, geschieht nichts. Nimmt die Anzahl Fussgänger etwas zu, so steigt die Querschwingung über die Wahrnehmungsgrenze, worauf die ersten Fussgänger Gegensteuer geben mit dem bekannten „Seemannsgang“. Dies wiederum verstärkt die Quer-Anregung, was zu stärkeren Querschwingungen führt und noch mehr Fussgänger zum „Seemannsgang“ zwingt und zwar alle im gleichen Takt. Die obere Begrenzung ist letztlich erst erreicht, wenn sich alle Leute am Geländer festhalten.

9.4 Formulierung der Belastungsfunktion

Für die dynamische Dimensionierung einer Fussgängerbrücke brauchen wir somit eine Belastungsfunktion, die den oben erwähnten Phänomenen angemessen Rechnung trägt. Sie hat insbesondere folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die zyklische Art der Belastung mit ihrem Einfluss auf die höheren harmonischen Schwingungen
- Die Wirkung einer Vielzahl von Personen (Synchronisation)
- Die räumliche Verteilung der Personen

Bevor wir nun die Formulierung der Belastungsfunktion angehen, wollen wir einige theoretische Betrachtungen über die Natur und die Wirkung von Schrittfolgen vorschalten.

9.4.1 Theoretische Betrachtungen

Der Last-Zeit-Verlauf beim gehenden Menschen kann – wie man in Bild 9.5 sieht – als Konstante Belastung (Eigengewicht) überlagert mit einer Sinusschwingung approximiert werden. Die zugehörige Darstellung im Frequenzbereich ist eine Frequenzspitze bei der Schrittfrequenz. Beim rennenden oder hüpfenden Menschen kann der Last-Zeit-Verlauf als Folge von Sinus-Impulsen approximiert werden, denn beim Rennen und beim Hüpfen verliert er den Kontakt zum Boden, d.h. die Last geht zwischendurch auf Null zurück. Die charakterisierende Grösse ist hier das Kontaktzeit-Verhältnis, das Verhältnis zwischen der Kontaktzeit und der Schrittdauer. Im Gegensatz zur reinen Sinusschwingung treten nun bei der Darstellung im Frequenzbereich zusätzlich Frequenz-

spitzen bei der doppelten, dreifachen und bei sehr kurzen Kontaktzeiten sogar bei der vierfachen Schrittfrequenz auf. Dies ist die Erklärung dafür, dass durch Rennen und Hüpfen nicht nur die Schritt- bzw. die Hüppfrequenz angeregt wird sondern auch die zweite und in sehr abgeschwächten Masse auch die dritte und die vierte Oberschwingung.

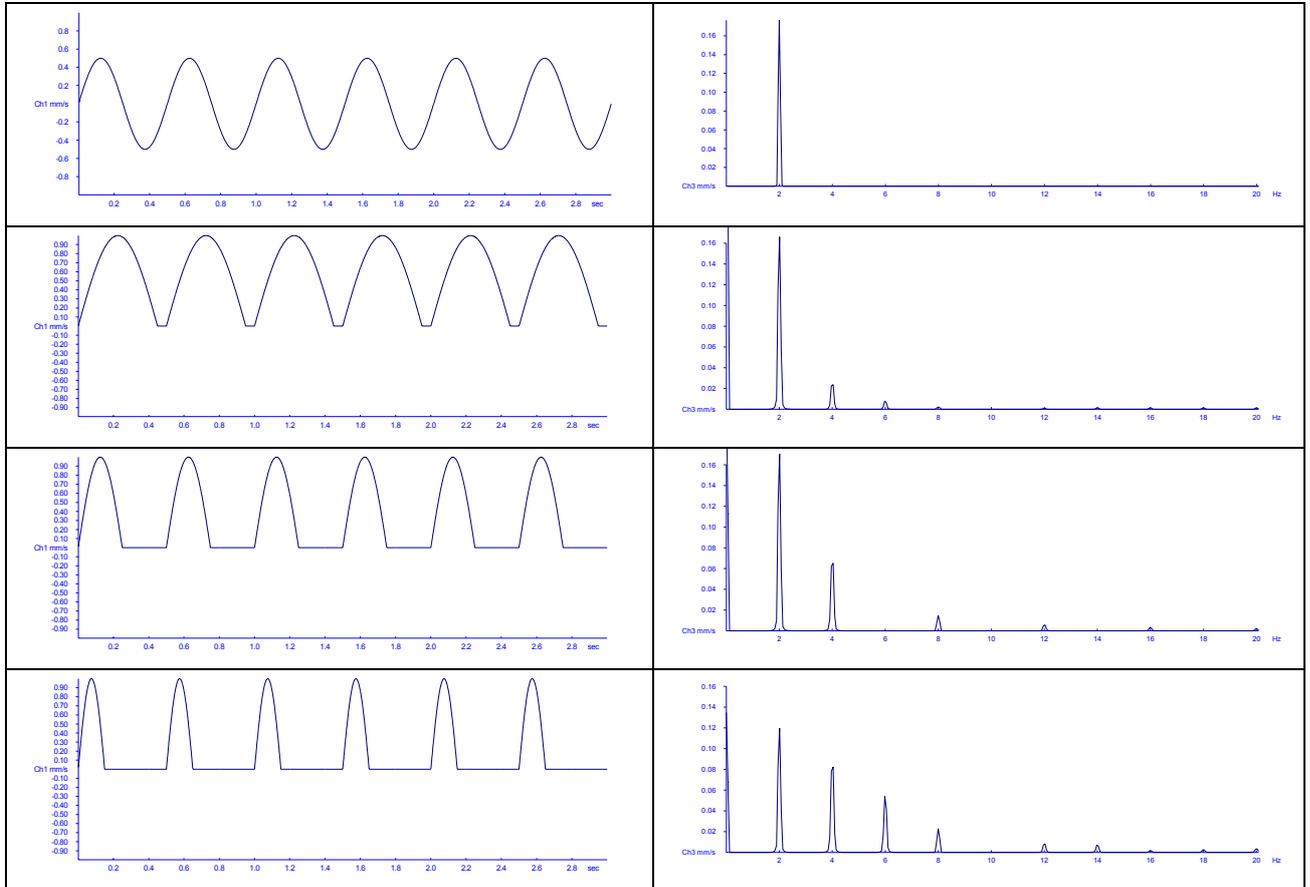


Bild 9.9a Lastzeitverläufe für eine Sinusschwingung und für sinusförmige Impulse mit Frequenzen von 2 Hz und Impulszeiten von 90 %, 50 % und 30 %

Bild 9.9b Amplitudenspektren für eine Sinusschwingung und für Sinusimpulse

9.4.2 Belastungsfunktion für vertikale Anregung

Die Belastungsfunktion für eine einzelne Person kann somit dargestellt werden als eine Summe von harmonischen Schwingungen in der Form von:

$$\begin{aligned}
 F_s(t) = & G + && \text{(Eigengewicht einer Person)} \\
 & \alpha_1 G \sin (2 \pi f_s t) + && \text{(1. harmonische mit } f = \text{ Schrittfrequenz)} \\
 & \alpha_2 G \sin (4 \pi f_s t - \phi_2) + && \text{(2. harmonische mit } f = 2 \times \text{ Schrittfrequenz)} \\
 & \alpha_3 G \sin (6 \pi f_s t - \phi_3) + \dots && \text{(3. harmonische mit } f = 3 \times \text{ Schrittfrequenz)}
 \end{aligned}$$

wobei in der Regel der 1. Sinusterm die Hauptrolle spielt. Stellt sich nur noch die Frage, wie die Grösse für α_1, α_2 usf. realistischerweise zu wählen ist. Untersuchungen von verschiedenen Autoren (Bild 9.10a) zeigen, dass der dynamische Lastfaktor (DLF oder α), d.h. das Verhältnis der dynamischen Lastamplitude zum Eigengewicht, mit zunehmender Schrittfrequenz zunimmt. Bei sehr langsamem Gehen liegt er bei 0.1 und erreicht bei zügigem Gehen Werte von 0.4 bis 0.7. Für die 2. Harmonische liegt der Lastfaktor im Bereich von 0.1. Dies deckt sich nicht schlecht mit den theoretischen Ergebnissen von Bild 9.9, wonach der Faktor für die 2. Harmonische etwa 30 % der 1. Harmonischen ausmacht.

Beim Rennen ergeben sich erwartungsgemäss wesentlich höhere Lastfaktoren. Die Zusammenstellung in Bild 9.10b zeigt, dass die Werte von 0.6 für langsames Rennen ansteigen bis auf 1.4 beim schnellen Rennen.

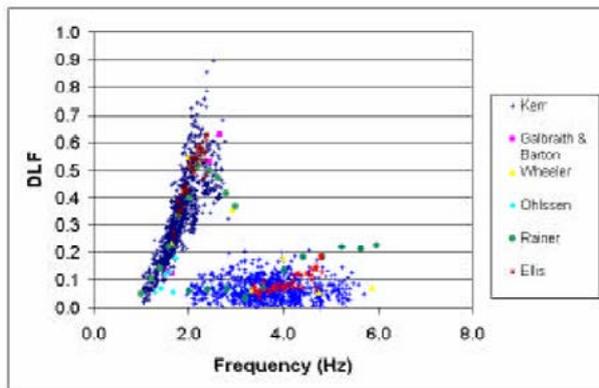


Bild 9.10a Verstärkungsfaktoren für „Gehen“ für die 1. und 2. Harmonische (aus [4])

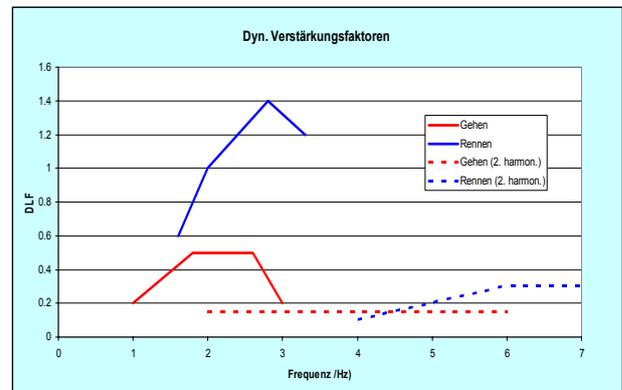


Bild 9.10b Verstärkungsfaktoren für „Gehen“ und „Rennen“ für die 1. und 2. Harmonische

Die für eine Person geltende Lastfunktion kann nun ausgeweitet werden auf mehrere Personen oder auf ganze Menschengruppen. Dabei sind – wie bereits erwähnt – der Synchronisationseffekt und die räumliche Verteilung angemessen zu berücksichtigen.

9.4.3 Belastungsfunktion für horizontale Anregung

Die Belastungsfunktion für horizontale Anregung entspricht einer harmonischen Anregung mit der halben Schrittfrequenz, d.h.:

$$F_s(t) = \alpha_h G \sin(\pi f_s t) \quad (1. \text{ harmonische mit } f = \frac{1}{2} \text{ Schrittfrequenz})$$

Die Grösse von α_h ist nun aber nicht primär abhängig von der Schrittfrequenz, sondern von der Bewegung der Unterlage. Bei ruhigem Boden dürfte α_h im Bereich von 1 bis 2 % liegen, wird aber bei einer quer schwingenden Bücke sehr rasch Werte von 5 bis 10 % erreichen. Ob nun für die Bemessung einer Brücke ein Wert von $\alpha_h = 2\%$ oder 10% einzusetzen ist, hängt sehr stark davon ab, ob unter realistischen Bedingungen mit spürbaren Querschwingungen zu rechnen ist und dies hängt wiederum von der Anzahl Personen auf der Brücke ab. Bei einer Brücke in Stadtmitte wird man ganz andere Menschenansammlungen annehmen müssen als bei einer Brücke, welche zwei Dörfer verbindet.

9.5 Berechnungsmethoden

Am Anfang steht immer die Handrechnung. Dieser Grundsatz wird immer wieder gepredigt aber selten befolgt. Gerade bei dynamischen Berechnungen ist es äusserst schwierig die Ergebnisse, welche der Computer mit einem FE-Modell mit tausenden von finiten Elementen erarbeitet hat, noch zu verifizieren. Deshalb ist beim Entwurf einer Fussgängerbrücke eine Abschätzung der Grundfrequenzen mit einem einfachen Modell unerlässlich. Selbstverständlich wird man in einer späteren Phase auf eine dynamische Berechnung mit dem erforderlichen Detailierungsgrad nicht verzichten

9.5.1 Handrechnung

Zumeist gelingt es eine Fussgängerbrücke oder eine einzelne Spannweite als einfachen Balken zu modellieren. Mit etwas Fantasie ist dies auch für Bogenbrücken mit abgehängter Fahrbahn möglich. Aus einem solchen einfachen Balken lässt sich problemlos ein äquivalenter Ein-Massen-Schwinger ableiten.

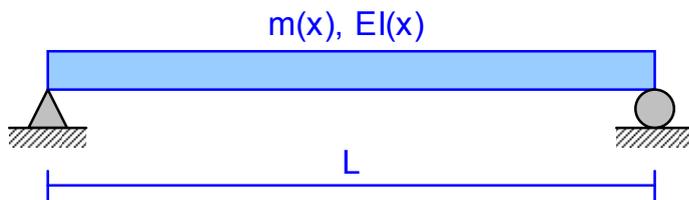


Bild 9.11a Idealisierung als einfacher Balken

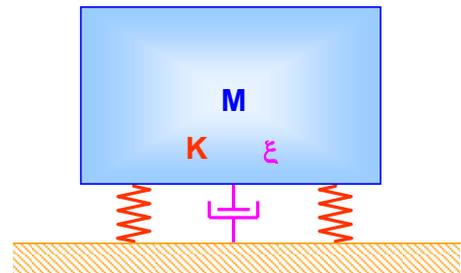


Bild 9.11b Idealisierung als 1-M-Schwinger

Die Bewegungsdifferentialgleichung für den Ein-Massen-Schwinger unter harmonischer Belastung lautet:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = P_0 \sin \bar{\omega}t \quad (9.5)$$

Daraus lässt sich mit etwas Geschick die maximale Schwingungsamplitude für verschiedene Frequenzverhältnisse β ableiten:

$$x_{\max} = \frac{P_0}{K} \sqrt{\frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (9.6)$$

Da uns primär der Resonanzfall interessiert, d.h. der Fall bei dem die Anregung mit der Eigenfrequenz zusammenfällt und $\beta = 1$ ist, vereinfacht sich Gl. (9.6) zu:

$$x_{\max, \beta=1} = \frac{P_0}{K} \frac{1}{2\xi} \quad (9.7)$$

Die dynamische Belastung lässt sich, wie wir weiter oben gesehen haben, ausdrücken als:

$$F(t) = G + \alpha_1 G \sin(2\pi f_s t) + \alpha_2 G \sin(4\pi f_s t - \varphi_2) + \alpha_3 G \sin(6\pi f_s t - \varphi_3) \quad (9.8)$$

Betrachten wir die Anregung in der Schrittfrequenz alleine, so lässt sich die Kraftamplitude, die von einer einzelnen Person verursacht wird, angeben als:

$$F_1 = \alpha_1 G \quad (9.9)$$

Die statische Auslenkung unter dieser Last beträgt:

$$d_{st} = \frac{\alpha_1 G}{K} \quad (9.10)$$

und mit dem Verstärkungsfaktor für den Ein-Massen-Schwinger bei Resonanz erhalten wir die maximale dynamische Auslenkung zu:

$$d_{dyn} = D \frac{\alpha_1 G}{K} = \frac{1}{2\xi} \frac{\alpha_1 G}{K} \quad (9.11)$$

Die dynamische Auslenkung ist somit gleich der statischen Auslenkung multipliziert mit dem Kehrwert der zweifachen Dämpfung. Die maximale Beschleunigung erhält man nach einigen Umformungen zu:

$$a_{dyn} = \frac{1}{2\xi} \frac{\alpha_1 G}{M} \tag{9.12}$$

d.h. sie ist proportional zur Last $\alpha_1 G$ und umgekehrt proportional zur Masse des Ein-Massen-Schwingers.

9.5.2 FE-Berechnung

FE-Programme und die Leistungsfähigkeit der heutigen Rechner bieten einen ausserordentlichen Komfort bei der dynamischen Berechnung. Die Bilder 9.12a bis d zeigen die wunderschöne Brücke über die Verzasca mit dem zugehörigen FE-Modell zusammen mit den ersten beiden Eigenformen. Wie es sich gehört wurden auch hier die Eigenfrequenzen der beiden ersten Modes mit einem Ein-Massen-Schwinger-Analog verifiziert.



Bild 9.12a Passerella sulla Verzasca

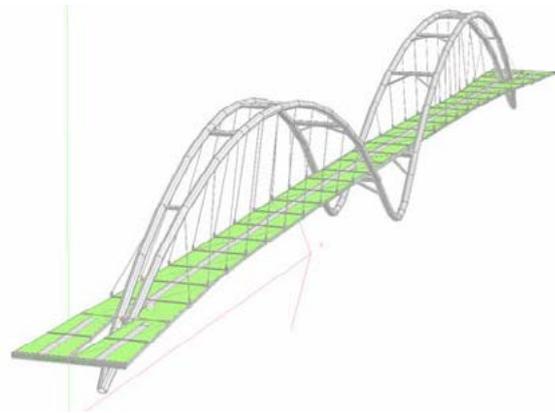


Bild 9.12b FE-Modell

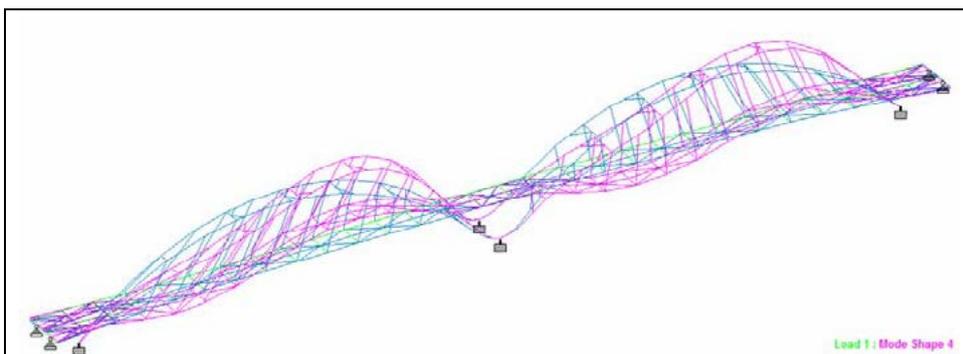


Bild 9.12c
1. Eigenform (vertikal);
ohne Verbund: 1.6 Hz
mit Verbund: 2.0 Hz

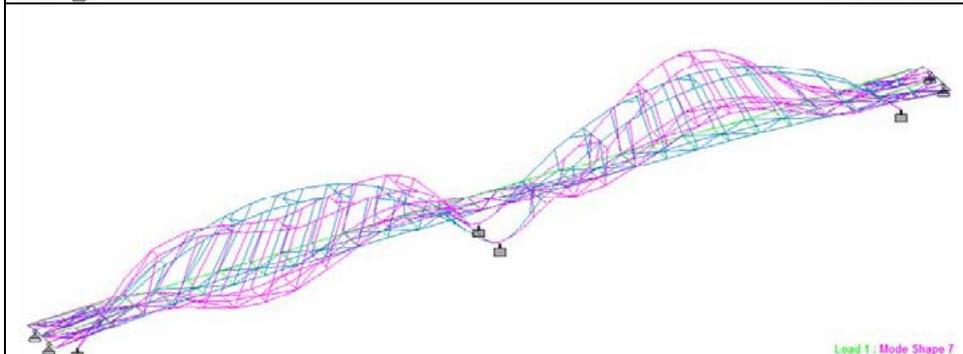


Bild 9.12d
2. Eigenform (vertikal)
ohne Verbund: 2.5 Hz
mit Verbund: 2.9 Hz

9.6 Schwingungstilger

Elegante Fussgängerbrücken werden in den wenigsten Fällen so steif sein, dass man a priori jegliche Schwingungsprobleme ausschliessen kann. Zumeist werden die während der Projektierung durchgeführten Berechnungen (mit den äusserst vorsichtig gewählten Werten für die Dämpfung und den konservativ festgelegten Belastungsannahmen) nachweisen, dass die Schwingungen viel zu gross werden. Ein geeignetes und auch weit verbreitetes Mittel zur Reduktion der Schwingungen einer Fussgängerbrücke ist der Schwingungstilger, im englischen unter dem Kürzel TMD (Tuned Mass Damper) bekannt. Die Funktionsweise des Schwingungstilger ist in Bild 9.13 schematische dargestellt. Eine Masse M_T mit Federsteifigkeit K_T und Dämpfung ξ_T wird dort am Träger befestigt, wo die Schwingung am stärksten ist. Der Schwinger schwingt nun im Gegentakt zum Balken und reduziert so die durch die Fussgänger verursachten Schwingungen.

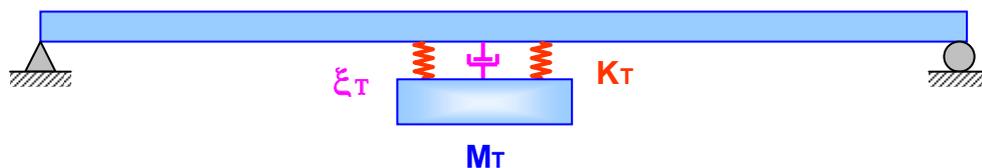


Bild 9.13 Schematische Darstellung eines Schwingungstilgers

Auf die mathematische Beschreibung des Systems (das im Prinzip als Zwei-Massen-Schwinger wirkt) wird hier verzichtet. Für eine erste Dimensionierung genügt es zu wissen, dass folgende Grundsätze gelten:

- Die Masse M_T soll 1 bis 2 % der modalen Masse betragen.
- Die Eigenfrequenz des Tilgers (bestimmt durch seine Masse M_T und die Federsteifigkeit K_T) muss exakt mit der Eigenfrequenz des Trägers übereinstimmen.
- Die Dämpfung ξ_T soll bei ca. 6 % liegen

Für die Berechnung der Wirkung eines Tilgers kann man davon ausgehen, dass sich die Dämpfung des Tilgers zur bereits vorhandenen Dämpfung der Brücke addiert. Es gilt zu beachten dass ein Tilger nur die Schwingung reduziert, für die er von seiner Frequenz her ausgelegt ist. Gerade bei nahe beieinander liegenden Eigenfrequenzen kann dies zu Problemen führen.

Schwingungstilger gibt es in vielen Variationen und Formen. In Bild 9.14 sind zwei Beispiele von Schwingungstilgern gezeigt.



Bild 9.14a Schwingungstilger mit geringer Bauhöhe in der Millenium-Brücke in London

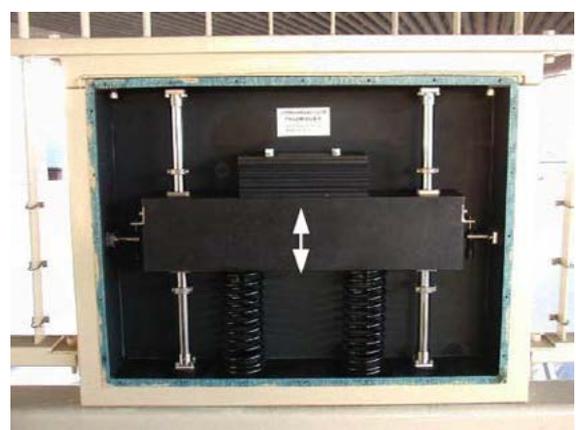


Bild 9.14b Schwingungstilger mit geringer Baubreite in einer Brücke in Japan

9.7 Akzeptanz-Kriterien

Die maximal zulässigen Schwingungen auf einer Fussgängerbrücke werden von verschiedenen Normen recht unterschiedlich festgelegt. In Bild 9.15 sind die Grenzwerte für vertikale Schwingungen von 5 verschiedenen Regelwerken zusammengestellt. Für den am meisten interessierenden Frequenzbereich von 2 Hz scheint eine recht gute Übereinstimmung vorzuliegen. Offensichtlich sollten die Schwingungen möglichst nicht höher liegen als 0.5 bis 0.7 m/s².

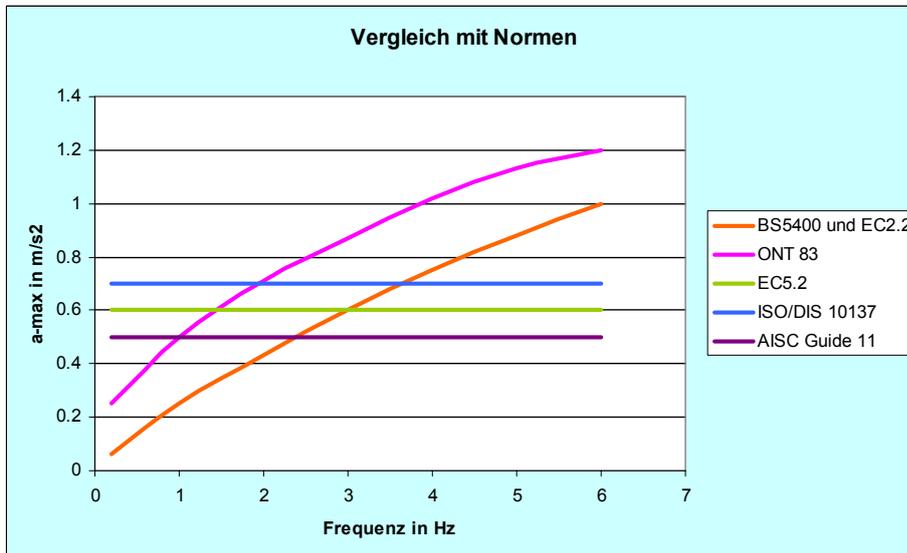


Bild 9.15 Grenzwerte für vertikale Schwingungen auf Fussgängerbrücken

Für horizontale Schwingungen findet man kaum Grenzwerte. Aus den Erfahrungen mit der Millennium-Brücke hat man gelernt, dass bis zu einer Schwingstärke von 0.25 m/s² normales Gehen gut möglich ist und dass man sich bei Schwingungen von 1.5 m/s² festhalten muss.

9.8 Testverfahren

Nach der erfolgreichen Errichtung einer Fussgängerbrücke und möglichst noch vor den Einweihungsfeierlichkeiten sollte das dynamische Verhalten der Brücke getestet werden. Erstens soll damit nachgewiesen werden, dass die berechneten Eigenfrequenzen mit den tatsächlich einigermassen übereinstimmen und zweitens sollte geprüft werden, ob sich die Brücke unter spezifischen Belastungen erwartungsgemäss verhält oder ob nicht doch noch die bis jetzt eingesparten Schwingungstilger eingebaut werden sollten.

9.8.1 Bestimmung der Eigenfrequenz und der Dämpfung

Für die Bestimmung der Eigenfrequenzen und der Dämpfung kommen zumeist „ambient vibration“ Messungen oder „forced vibration“ Messungen zum Zug. Bei den ersteren werden die stets vorhandenen minimalen Brückenschwingungen während längerer Zeit gemessen, um daraus über die Amplitudenspektren die dominanten Frequenzen zu ermitteln. Bei der zweiten Methode wird die Brücke mit einem dynamischen Erreger angeregt. Mit einem langsamen Sweep von der tiefsten bis zur höchsten interessierenden Frequenz werden der Reihe nach alle Frequenzen angeregt. Bild 9.16 zeigt diesen Vorgang für die Passerella sulla Verzasca. Mit dem Sensor auf der schwingenden Masse wird die Beschleunigung gemessen und dadurch die wirkende Kraft berechnet, mit dem Sensor auf der Brücke (neben dem dyn. Erreger) wird die Schwinggeschwindigkeit gemessen und daraus die Wegamplitude berechnet. Das Verhältnis zwischen diesen beiden Grössen ergibt schliesslich die Response-Kurve aus der die Eigenfrequenzen entnommen werden können.



Bild 9.16a Passerella sulla Verzasca



Bild 9.16b „Forced vibration“ Anregung mit einem elektrodynamischen Erreger.

Die Dämpfung wird mit Vorteil mit einem Ausschwingversuch über das logarithmische Dekrement bestimmt. Grundsätzlich käme auch die so genannte „Half-power-bandwidth“ Methode in Frage, doch bietet die erstgenannte Methode bei den üblicherweise doch sehr geringen Dämpfungen die grössere Genauigkeit.

9.8.2 Anregung durch Personen

Belastungstests mit Personen sollten das Verhalten unter realistischen Bedingungen simulieren. Dazu gehört selbstverständlich auch die Wahl einer realistischen Anzahl von Testpersonen. In der Regel wird man – zumindest für die vertikale Anregung – nicht über 10 bis 20 Testpersonen hinausgehen müssen, da auch in der späteren Nutzung kaum eine Synchronisierung von mehr als 20 Personen stattfinden wird. Tests sollten für normales Gehen, für Rennen, für Hüpfen und für mutwillige Anregung durchgeführt werden.

Testbelastungen für Brücken-Querschwingungen sind problematisch. Denn erst mit dem Vorhandensein einer genügenden Anzahl von Personen treten diese kritischen Schwingungszustände auf. Andererseits macht es wenig Sinn, eine viel grössere Personenzahl in einen Test einzusetzen, als später je die Brücke benutzen werden.

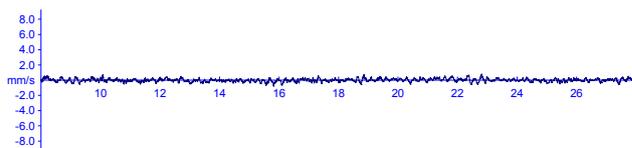
9.9 Beispiele

Millenium Bridge - London

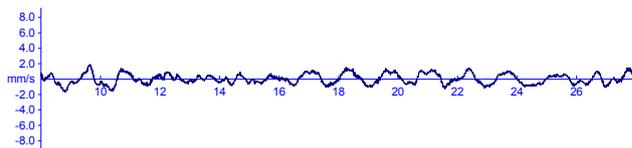


Die Millenium Brücke über die Themse in London ist eine moderne Hängebrücke, deren Stahlseile nur sehr gering durchhängen. Es wurden viele dynamische Vorberechnungen durchgeführt. Am Eröffnungstag zeigt die Brücke jedoch so starke Querschwingungen, dass sie umgehend für den Publikumsverkehr gesperrt wurde. In der Folge wurden sehr umfangreiche Schwingungsmessungen und Berechnungen durchgeführt, um das Phänomen der Querschwingungen unter Kontrolle zu bringen.

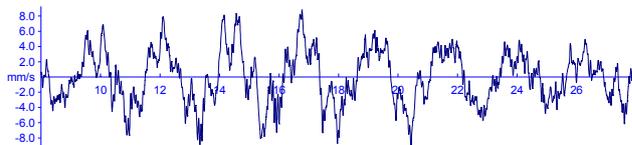
Spannweiten: 81 m, 144 m, 108 m
 Tiefste Eigenfrequenzen vertikal: 0.42 Hz, 1.76 Hz
 Tiefste Eigenfrequenzen horizontal-quer: 0.68 Hz, 0.78 Hz, 1.78 Hz



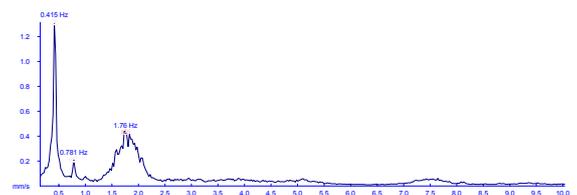
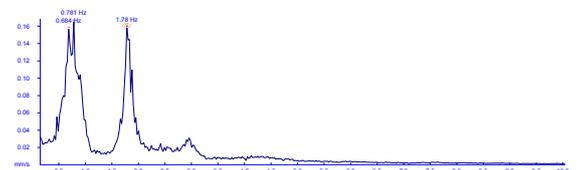
Schwingung in Brücken-Längsrichtung



Schwingung in Brücken-Querrichtung



Vertikale Schwingung



Zur Reduzierung der Schwingungen wurden zwei Massnahmen beschlossen: In einigen Brückenfeldern wurden 1-dimensional wirkende Dämpfer (vollstümlich Stossdämpfer genannt) an diagonal verlegten Zugstangen unter der Brücke installiert. Gegen die Vertikalschwingungen wurden insgesamt 50 Schwingungstilger eingebaut und gegen die Horizontalschwingungen 8 Horizontalschwingungstilger.

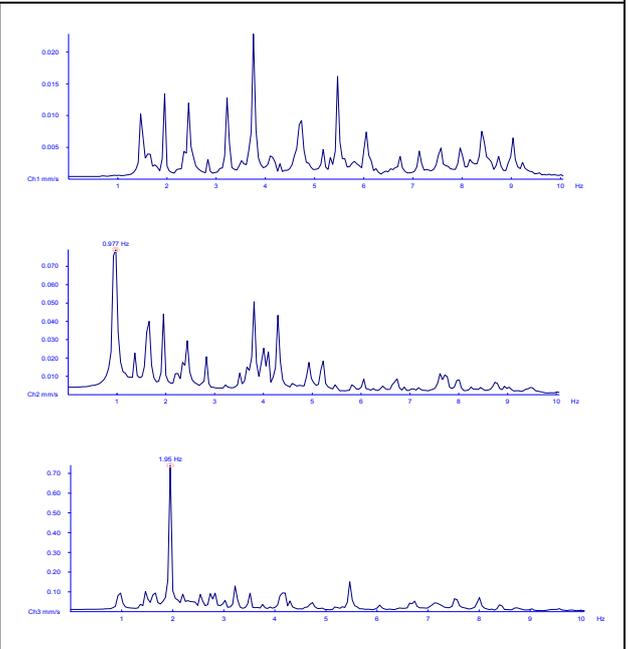
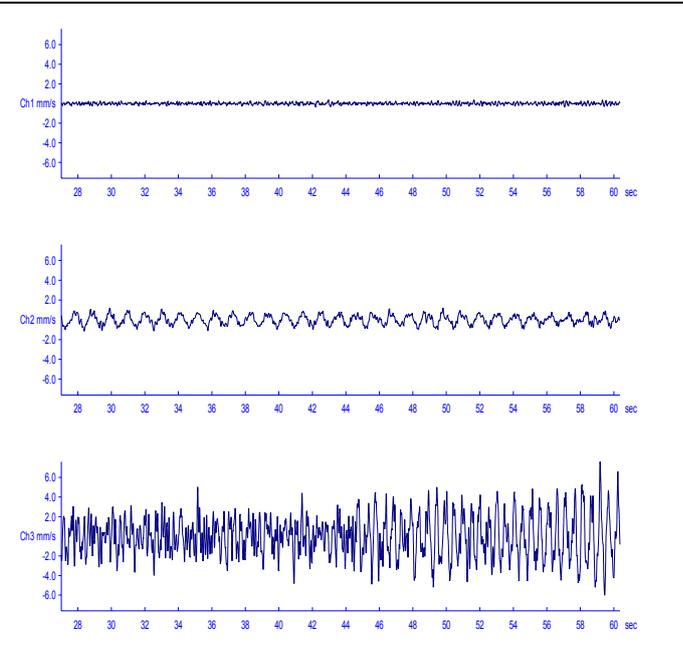


Dreiländerbrücke – Weil am Rhein



Die Dreiländerbrücke zwischen Weil am Rhein in Deutschland und Hüningen in Frankreich ist die weltlängste Fußgänger- und Velobrücke. Diese Stahlbrücke hat eine freie Bogenspannweite von 229.4 m und einen Stich von lediglich 23 m. Die mit dem geringen Bogenstich einhergehende Weichheit der Konstruktion machte das Bauwerk zu einer technischen Herausforderung nicht nur in statischer Hinsicht, sondern gerade auch in Hinblick auf das dynamische Schwingungsverhalten infolge personeninduzierter Anregung.

Spannweite des freien Bogens:	229.4 m
Tiefste Eigenfrequenz vertikal:	1.95 Hz
Tiefste Eigenfrequenz horizontal-quer:	0.98 Hz



Es fanden Schwingungsversuche unter Beteiligung von 800 freiwilligen Testpersonen statt. Die Bewegungsrichtung wurde jeweils vorgegeben, synchrones Gehen wurde aber nicht provoziert. Das normale Gehen führte zu einer Querschwingung mit ca. 1 Hz. Ab Beschleunigungen von 0.3 m/s^2 passten sich die Fußgänger automatisch und unbewusst an diese Schwingung an und synchronisierten sich dadurch, was zu einer zusätzlichen Verstärkung der Brückenquerschwingung führte. Dieser Ursache-Wirkungs-Kreislauf verstärkt sich innerhalb Sekunden immer mehr und führt zu einem Schwingungszustand, bei dem normales Gehen nicht mehr möglich ist (aus [5]).

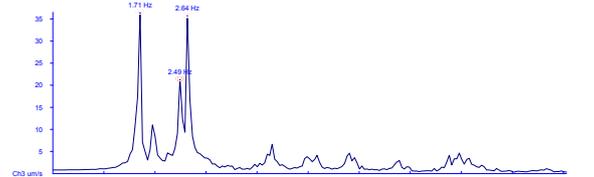
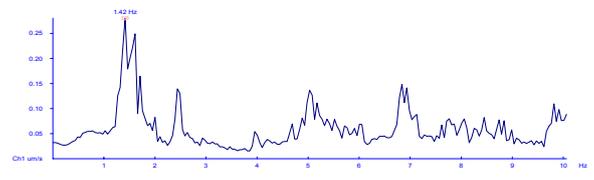
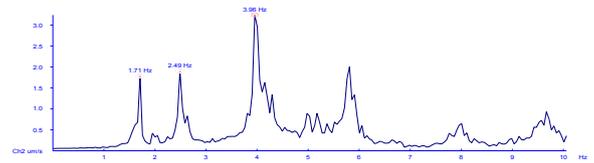
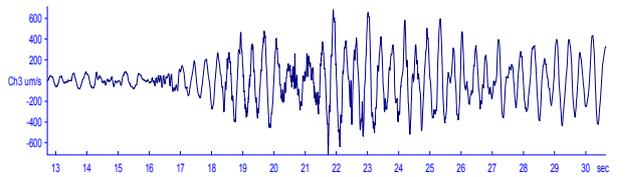
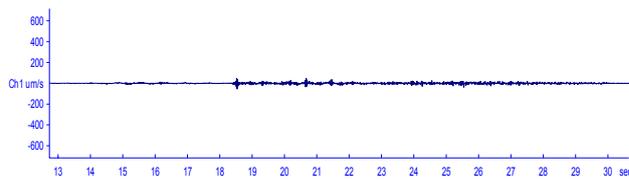
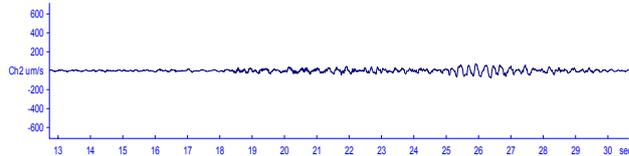


Passerella sulla Vercasca – Tenero bei Locarno



Die neue Fussgänger-/Fahrradbrücke über die Verzasca in Tenero ist als Zweifeld-Hängebrücke in Stahl-Bauweise erstellt worden. Die Spannweite beträgt 2 x 60 m. Dass diese elegante und schlanke Struktur für dynamische Beanspruchungen kritisch sein wird, war von Anfang an klar. Erste Berechnungen liessen sogar befürchten, dass die Brücke so gar nicht gebaut werden kann. Weitere Berechnungen ergaben, dass die Brücke zwar realisiert werden kann, allerdings nur mit dem Einbau von 12 Schwingungstilgern, eine Lösung die kostenmässig kaum zu verkraften war.

Spannweite:	2 x 60 m
Tiefste Eigenfrequenzen vertikal:	1.71 Hz, 2.49, 2.64 Hz
Tiefste Eigenfrequenz horizontal-quer:	1.42 Hz
Dämpfung:	0.3 %



Weitere Berechnungen mit realistischeren Annahmen zur Belastung ergaben, dass vier Schwingungstilger erforderlich sein werden. Die Aussparungen hierfür wurden vorgesehen, mit der Beschaffung der Tilger wurde aber sinnvollerweise zugewartet. Nachdem die Testmessungen nach Fertigstellung der Brücke ein vollständig zufriedenstellendes Ergebnis ergaben, wurde auf den Einbau von Schwingungstilgern ganz verzichtet.

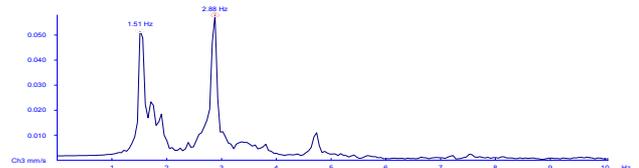
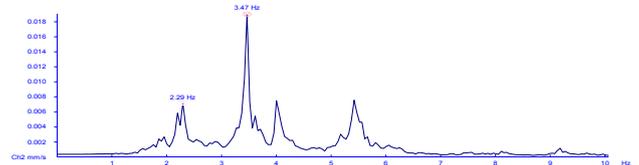
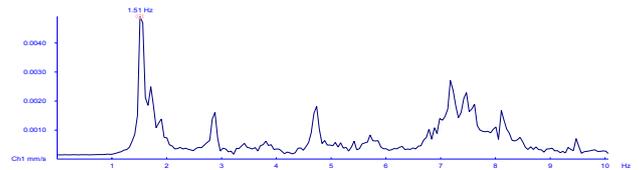
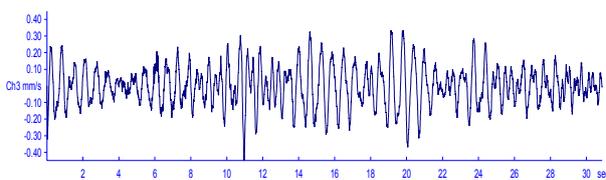
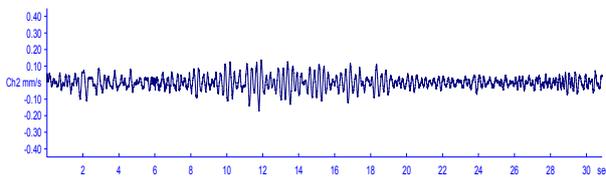
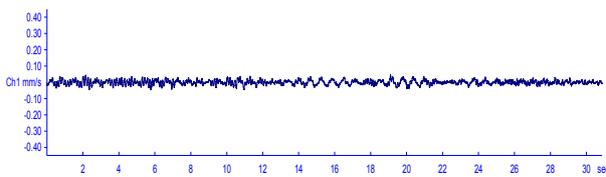


Wylandbrücke – Winterthur



Die Wylandbrücke in Winterthur wurde als 2-Feld-Träger in Stahlfachwerk-Beton-Verbundkonstruktion mit Spannweiten von 62 und 45 m projektiert. Mittels einer einfachen Handrechnung wurde abgeklärt, ob die Eigenfrequenzen der Brücke in einem kritischen Bereich liegen. Für die Längere Spannweite von 62 m wurde eine Eigenfrequenz von 1.87 Hz und für die kürzere eine Eigenfrequenz von 3.54 Hz ermittelt. Es war somit klar, dass Aussparungen für Schwingungstilger vorzusehen waren. Mit der Beschaffung der Tilger wurde jedoch zugewartet.

Spannweiten:	62 m, 45
Tiefste Eigenfrequenzen vertikal:	1.51 Hz, 2.88 Hz
Tiefste Eigenfrequenzen horizontal-quer:	2.29 Hz, 3.47 Hz
Dämpfung:	0.7 %



Nach Fertigstellung der Brücke wurden Testmessungen mit „Ambient Vibration“-Messungen, mit Anregung durch einen elektro-dynamischen Erreger und durch Anregung durch Personen (Gehen, Rennen, Hüpfen und mutwillige Anregung) durchgeführt. Die Schwingungen lagen allesamt unterhalb 0.6 m/s^2 und somit im akzeptablen Bereich, sodass auf den Einbau der Tilger verzichtet werden konnte.

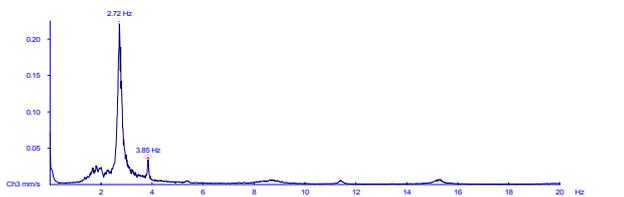
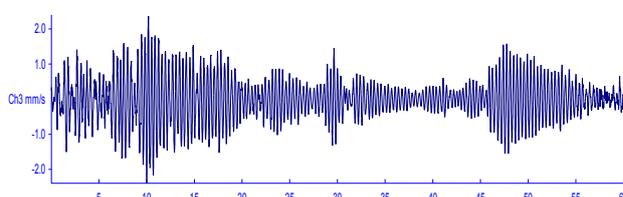
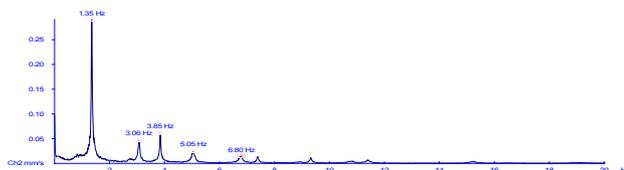
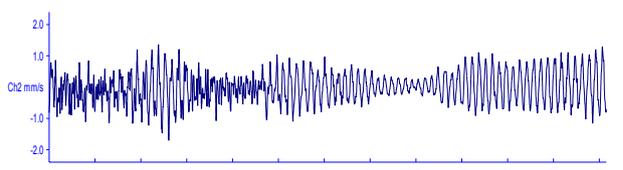
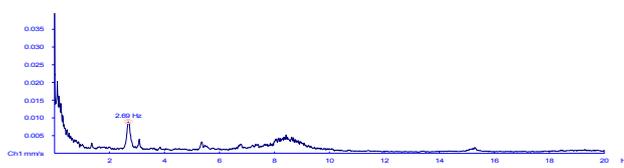
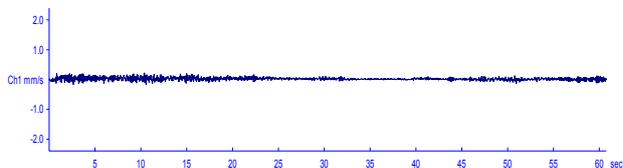


Limmatsteg – Baden

Die neue Fußgängerbrücke (Limmatsteg) über die Limmat in Baden ist als Einfeld-Träger in Stahl-Bauweise erstellt worden. Die Spannweite beträgt 52 m.



Spannweiten:	52 m
Tiefste Eigenfrequenz vertikal:	2.72 Hz
Tiefste Eigenfrequenzen horizontal-quer:	1.35 Hz, 3.06 Hz
Dämpfung:	0.9 %



Nach Fertigstellung der Brücke wurden Testmessungen mit „Ambient Vibration“-Messungen, mit Anregung durch einen elektro-dynamischen Erreger und durch Anregung durch Personen (Gehen, Rennen, Hüpfen und mutwillige Anregung) durchgeführt. Die Schwingungen lagen allesamt unterhalb 0.6 m/s^2 und somit im akzeptablen Bereich.



Literatur

- [1] Bachmann H.; "*Lively Footbridges – a Real Challenge*; Design and dynamic behaviour of footbridges", Footbridge 2002, Paris
- [2] Weber B.; "*Damping of vibrating footbridges*; Design and dynamic behaviour of footbridges", Footbridge 2002, Paris
- [3] Kasperski M.; "Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken unter menscheninduzierten Lasten", 9. Symposium für Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, 2006, Dübendorf / Zürich
- [4] Willford M.; "*Dynamic actions and reactions of pedestrians*; Design and dynamic behaviour of footbridges", Footbridge 2002, Paris
- [5] Mistler M, Heiland D.; "Lock-in-Effekt bei Brücken infolge Fussgängeranregung – Schwingungstest der weltlängsten Fussgänger- und Velobrücke - Dreiländerbrücke"; D-A-CH Tagung 2007, Wien
- [6] Zivanovic S. et al.; "Human-structure dynamic interaction on footbridges"; Proceedings of the institution of Civil Engineers, Bridge Engineering 158, December 2005, Issue BE4, pp 165-177.