



Leitfaden für die Bemessung von Fußgängerbrücken



Schlaich Bergemann
und Partner
Structural Consulting
Engineers

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Begriffsbestimmungen	5
3	Bemessungsverfahren	8
4	Vorgehen bei der Bemessung	11
4.1	Schritt 1: Bestimmung der Eigenfrequenzen.....	11
4.2	Schritt 2: Identifizierung kritischer Eigenfrequenzen.....	11
4.3	Schritt 3: Wahl der Bemessungssituation.....	11
4.3.1	Schritt 3a: Bestimmung der Verkehrsklassen	15
4.3.2	Schritt 3b: Bestimmung der Komfortklassen	16
4.4	Schritt 4: Abschätzung der Dämpfung	17
4.4.1	Dämpfungsmodell	17
4.4.2	Dämpfungswerte unter Gebrauchslasten	18
4.4.3	Dämpfungswerte für große Amplituden	18
4.5	Schritt 5: Berechnung der Beschleunigung	19
4.5.1	Harmonische Lastmodelle für Fußgänger	19
4.5.2	Antwortspektrumverfahren für Fußgängerströme.....	23
4.6	Schritt 6: Überprüfung des seitlichen Lock-in-Risikos.....	25
4.7	Schritt 7: Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	26
5	Bewertung der dynamischen Brückeneigenschaften	27
5.1	Einführung	27
5.2	Messung der Schwingungsantwort	27
5.2.1	Messung der Grundschrwingungen und Bestimmung der kritischen Eigenfrequenzen	28
5.2.2	Abschätzung der Dämpfung für kritische Eigenfrequenzen.....	28
5.2.3	Messungen der durch einen Fußgänger verursachten Schwingungen	28
5.2.4	Messungen der durch Fußgängergruppen verursachten Schwingungen	29
5.2.5	Messung der durch Fußgängerströme verursachten Schwingungen ..	29
5.3	Bestimmung der dynamischen Brückeneigenschaften	29
5.3.1	Untersuchungen unter Zwangserregung	29
5.3.2	Messung ambienter Schwingungen	30
5.3.3	Messung freier Schwingungen.....	30
5.4	Messgeräte.....	30
5.4.1	Messaufnehmer	30
5.4.2	Geräte zur Kenngrößenerfassung	31
6	Schwingungskontrolle.....	32

6.1	Einführung	32
6.2	Änderung der Masse	32
6.3	Änderung der Frequenz	32
6.4	Erhöhung der Dämpfung	32
6.4.1	Einführung	32
6.4.2	Einfache (konstruktive) Maßnahmen	33
6.4.3	Zusätzliche Dämpfer.....	33
7	Literatur	37

Häufig verwendete Symbole

a_{limit}	Zu einer Komfortklasse zugehörige Grenzbeschleunigung	[m/s ²]
a_{max}	Zu einer Bemessungssituation zugehörige berechnete maximale Beschleunigung	[m/s ²]
B	Breite	[m]
d	Dichte des Fußgängerstroms auf der Brücke	[P/m ²]
f, f_i	Eigenfrequenz bzw. Eigenfrequenz der i-ten Eigenform/Mode	[Hz]
f_s	Schrittfrequenz eines Fußgängers	[Hz]
$P(t) ??$	Zeitlich und räumlich veränderliche Belastung infolge eines einzelnen Fußgängers	[N]
$P \times \cos(2\pi ft)$	Harmonische Belastung infolge eines einzelnen Fußgängers	[N]
L	Länge	[m]
m^*	Modale Masse	[kg]
M	Masse	[kg]
n	Anzahl der Fußgänger auf der belasteten Fläche S ($n = S \times d$)	[P]
n'	Äquivalente Anzahl Fußgänger auf der belasteten Fläche S	[P/m ²]
$p(t)$	Zeitlich veränderliche Flächenlast	[kN/m ²]
S	belastete Fläche	[m ²]
δ	Logarithmisches Dekrement der Dämpfung	[-]
μ	Masse des Brückendecks pro Längeneinheit	[kg/m]
$\Phi(x)$	Schwingungsform/Modalform/Eigenform	[-]
ψ	Faktor zur Berücksichtigung der Möglichkeit, dass Schrittfrequenzen im Bereich der betrachteten Eigenfrequenz liegen.	[-]
ξ	Lehr'sches Dämpfungsmaß,	[-]

1 Einleitung

Das Schwingungsverhalten von Fußgängerbrücken hat eine zunehmende Rolle bei der Bemessung eingenommen. Der Grund dafür ist zum einen der Wunsch nach ausgefallenen Konstruktionen, z.B. Hängebrücken oder Spannbandbrücken; zum anderen werden zunehmend hochfestere Werkstoffe verwendet, was zu einer Verringerung des Verhältnisses von Verkehrslast zu ständiger Last führt.

Als Folge dieser Entwicklung sind viele neue Fußgängerbrücken schwingungsanfälliger gegenüber dynamischen Anregungen. Neben der dynamischen Windanregung erfolgt die häufigste dynamische Anregung durch Fußgänger, die beim Gehen und Laufen dynamische Kräfte auf das Bauwerk übertragen.

Die Bemessungshilfe sowie die Hintergrundinformationen sind erarbeitet worden von:

- Christiane Butz und Christoph Heinemeyer
RWTH Aachen, Deutschland,
- Andreas Keil, Mike Schlaich, Arndt Goldack und Stefan Trometer
Schlaich Bergermann und Partner, Deutschland,
- Mladen Lukić, Bruno Chabrolin, Arnaud Lemaire und Pierre-Olivier Martin
Centre Technique Industriel de la Construction Métallique, Frankreich,
- Álvaro Cunha und Elsa Caetano
Faculdade de Engenharia do Universidade do Porto, Portugal.

Die Bemessungshilfe wurde auf Grundlage der Forschungsergebnisse des Forschungsprojektes RFS-CR-03019 "Advanced Load Models for Synchronous Pedestrian Excitation and Optimised Design Guidelines for Steel Footbridges (SYNPEX)" entwickelt, welches vom "Research Fund for Coal and Steel (RFCS)" der Europäischen Gemeinschaft finanziert wurde.

Ein Großteil der Angaben in dieser Bemessungshilfe wird im begleitenden Hintergrundbericht [1] erläutert.

2 Begriffsbestimmungen

Die in der Bemessungshilfe verwendeten Begriffe werden im folgenden erläutert:

Beschleunigung
(Acceleration) zeitliche Änderung der Geschwindigkeit v (dv / dt bzw. d^2x / dt^2) üblicherweise in Richtung einer Koordinatenachse . Sie wird häufig in g angegeben.

Vergrößerung
(Amplification) Vorgang des Ansteigens einer veränderlichen Größe

Dämpfer
(Damper) Bauteil bzw. Bauelement , was z.B. durch Energiedissipation die Schwingungen der Brücke reduziert .

Dämpfung
(Damping) Jeder Effekt der entweder absichtlich erzeugt oder inhärent zu einer Reduzierung der Amplituden eines schwingenden Systems führt. Dämpfung besteht aus Energiedissipation im Schwingungssystem.

Die Dämpfung setzt sich zusammen aus:

- Material- oder Strukturdämpfung
- Dämpfung durch nichttragende Bauteile (z.B. Belag, Geländer, Beleuchtung)
- Verteilung der Energie über das Gesamttragwerk (scheinbare Dämpfung, Dispersion)

Dynamische Einwirkung
(Dynamic action) Zeitlich veränderliche Einwirkung, die Beschleunigungen des Tragwerks oder von Bauteilen hervorrufen kann.

Modale Masse = generalisierte Masse
(Modal mass = generalised mass) Bauwerke werden zu Systeme mit n Freiheitsgraden vereinfacht, die n Eigenformen mit zugehörigen Eigenfrequenzen besitzen. So kann das Bauwerk zu einer Kombination von mehreren Systemen mit je einem Freiheitsgrad (SDOF = single degree of freedom) und entsprechenden Eigenfrequenzen reduziert werden:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k^*}{m^*}}$$

dabei ist

- f_i Eigenfrequenz in Hz der Mode i
- k_i^* die modale Steifigkeit der Mode i
- m_i^* die modale Masse der Mode i .

Die modale Masse ist die Masse, die bei einer bestimmten Schwingungsform aktiviert wird.

Schwingungsform=
Schwingungsmode
Eigenform
(Mode of vibration)

Bauwerke besitzen verschiedene Eigenfrequenzen. Zu jeder Frequenz gibt es eine charakteristische Eigenschwingungsform, die auch kurz "Eigenform" oder "Mode" genannt wird.

Eine charakteristische Form eines Schwingungssystem, bei der jedes sich bewegende Teilchen des Systems eine harmonische Bewegung bei gleicher Frequenz ausführt. Bei Systemen mit mehreren Freiheitsgraden können zwei oder mehr konkurrierende Schwingungsformen bestehen.

Eigenfrequenz
(Natural frequency =
Eigenfrequency)

Die Eigenfrequenz ist die Frequenz eines freischwingenden Systems. Bei Systemen mit mehreren Freiheitsgraden sind die Eigenfrequenzen die Schwingungsfrequenzen der einzelnen Schwingungsformen.

Jedes System besitzt so viele Eigenfrequenzen und Schwingungsformen wie Freiheitsgrade. Diese werden allgemein entsprechend der Energie sortiert, die zum Schwingungen aktiviert wird.

Die Grundschiwingung ist demnach die, für die die geringste Energie aktiviert werden muss und ist damit die am wahrscheinlichsten auftretende.

Die Eigenfrequenz eines Systems mit einem Freiheitsgrad (SDOF) beträgt:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Dabei ist

K die Steifigkeit

M die Masse.

Die Ermittlung der Eigenfrequenzen wird in Abschnitt 4.1 behandelt.

Die Frequenz f ist der Kehrwert der Schwingungsperiode T ($f = 1 / T$).

Resonanz
(Resonance)

Bei Resonanz wird ein schwingungsfähiges System mit seiner Eigenfrequenz durch Energiezufuhr angeregt. Die Phasenverschiebung zwischen Erreger und erzwungener Schwingung beträgt 90° , der Energieübertrag auf das schwingungsfähige System ist in diesem Fall maximal. Hierdurch kann die Amplitude des angeregten Systems auf ein Vielfaches der Erregeramplitude ansteigen.

Antwortspektrum (Response spectrum)	Ein Antwortspektrum ist die Darstellung der Strukturantwort im Frequenzbereich (Verformung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung) bei stationären zwangserregten Schwingungen.
Spektrum (Spectrum)	Beschreibung eines Signals im Frequenzbereich in Form von Amplitude und Phase oder Realteil und Imaginärteil.

3 Bemessungsverfahren

Die in den letzten Jahren vermehrt aufgetretenen Schwingungsprobleme zeigen, dass Fußgängerbrücken nicht nur für statische sondern auch für dynamische Lasten ausgelegt werden sollten. In der Bemessung sollten durch Fußgänger hervorgerufene Schwingungen als ein Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt werden. Zur Zeit existieren für diese Bemessung keine Normen oder es werden nur grobe Anhaltswerte gegeben.

Das Fehlen von Bemessungsmodellen in Normen ermöglicht dem Tragwerksplanern zwar einen großen Spielraum, wodurch in den letzten Jahren eine große Vielfalt an Fußgängerbrücken, viele mit innovativen Tragwerken, entstanden sind. Dennoch ist es wichtig zu wissen, ob und wie Fußgängerbrücken schwingen und ob die Schwingungen im Rahmen der Vorstellung des Kunden oder Eigentümers liegen.

Daher spielt die Frage "Sind die gewünschten Komfoteigenschaften bei den Brückenschwingung erfüllt?" beim Entwurfsprozess eine wichtige Rolle. Schließlich stellen (möglicherweise erforderliche) Dämpfer nicht nur eine nachträgliche Ausrüstungskomponenten dar, sondern müssen bereits im Entwurf mit berücksichtigt werden.

Die grundsätzliche Vorgehensweise des Bemessungsverfahrens wird in Bild 3-1 dargestellt.

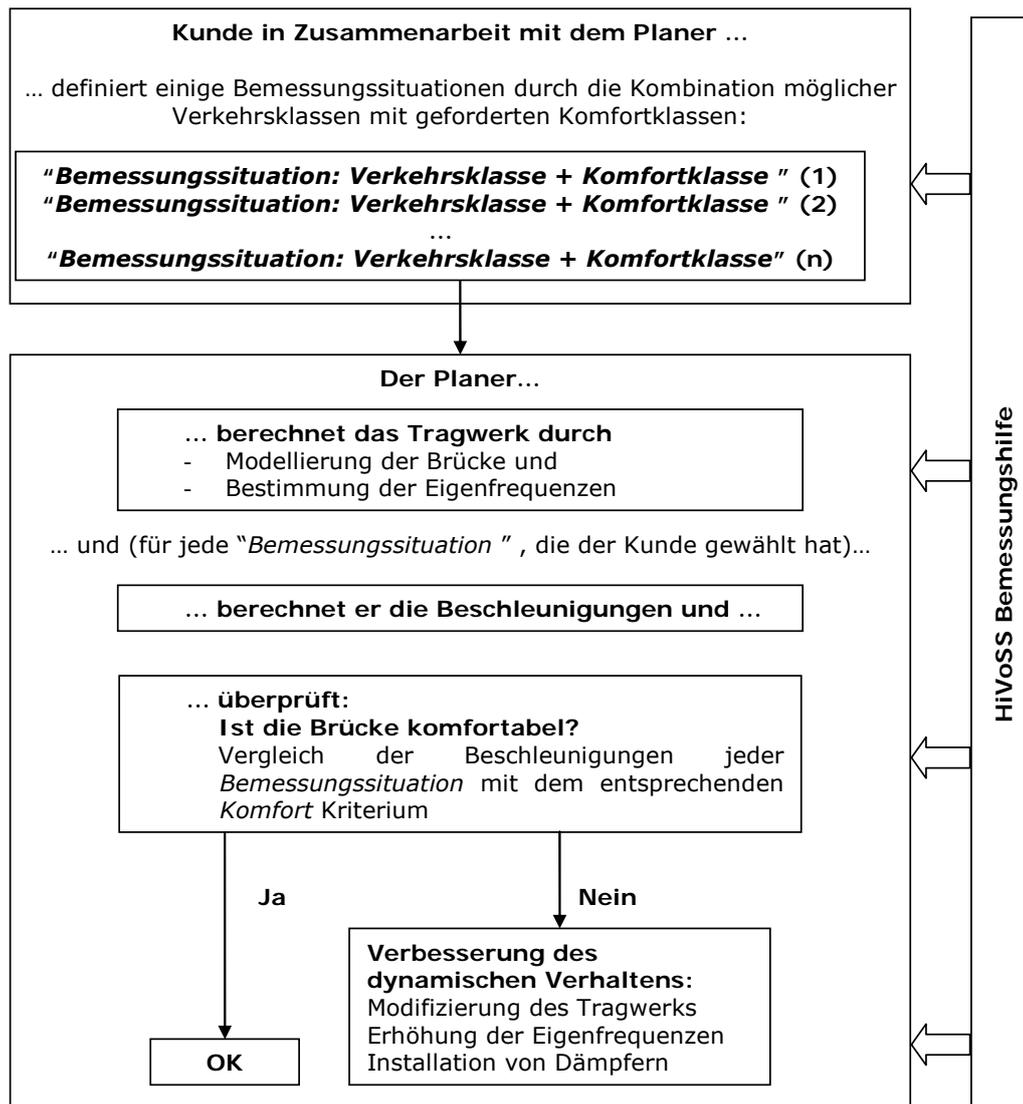


Bild 3-1: Bemessungsverfahren

Das Flussdiagramm in Bild 3-2 zeigt, wie das dynamische Verhalten der Brücke überprüft werden kann und wie diese Bemessungshilfe anzuwenden ist. Die einzelnen Bemessungsschritte werden in Abschnitt 4 erläutert.

Tragfähigkeit Standsicherheitsfragen wie Spannungsausnutzung und Ermüdung können ebenfalls auftreten und müssen bei der Bemessung berücksichtigt werden.

In Bezug auf Zuverlässigkeitsregelungen der Eurocodes behandelt diese Bemessungshilfe ausschließlich die Frage des reversiblen Gebrauchszustands. Bemessungshilfen für die Spannungsausnutzung und Ermüdung werden an anderer Stelle gegeben.

Insbesondere sind alle Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (SLS) und der Tragfähigkeit (ULS) nach geltenden Normen nachzuweisen.

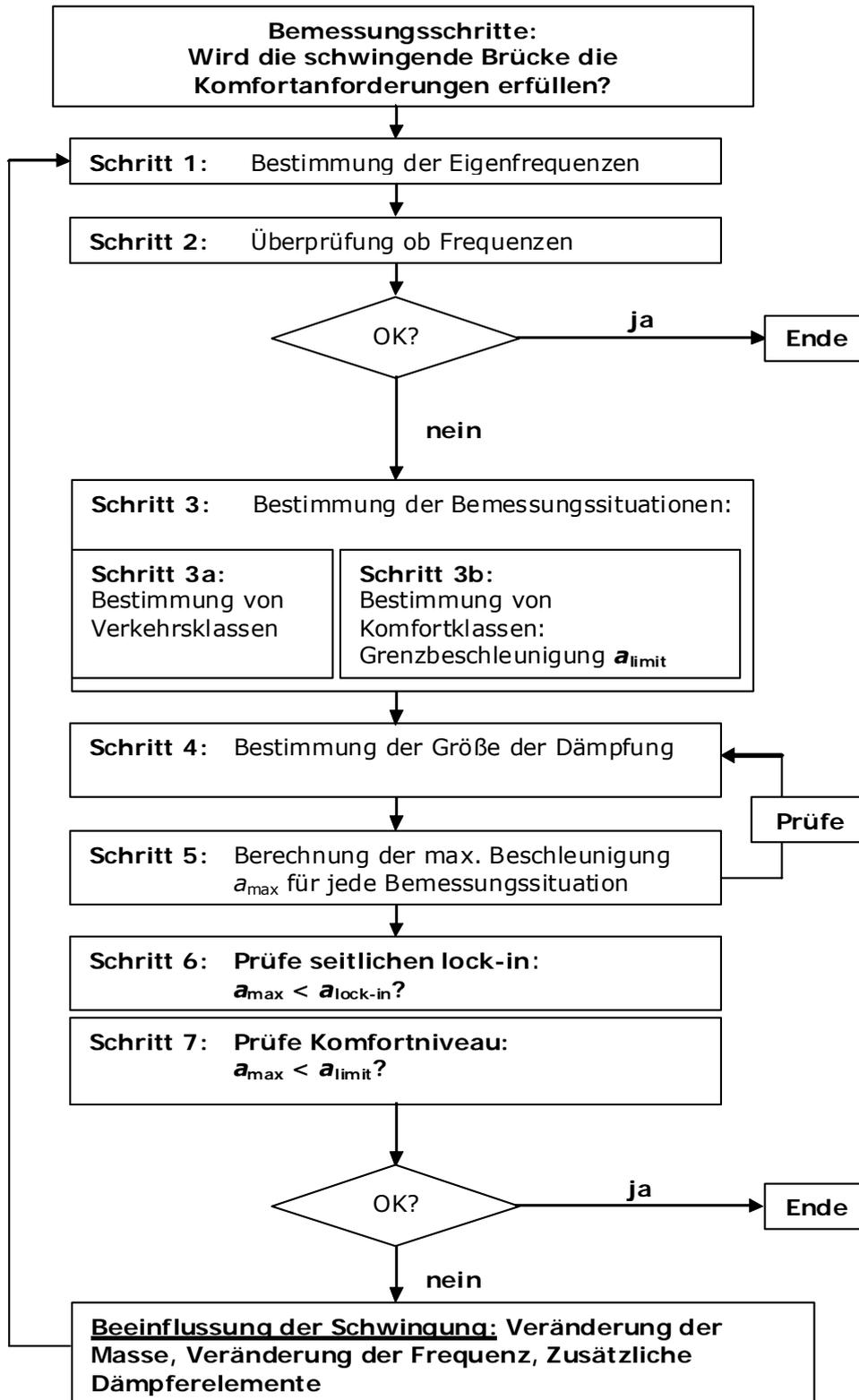


Bild 3-2: Flussdiagramm zur Verwendung dieser Bemessungshilfe

4 Vorgehen bei der Bemessung

4.1 Schritt 1: Bestimmung der Eigenfrequenzen

Die Eigenfrequenzen können im Rahmen der Vorbemessung mit verschiedenen Verfahren bestimmt werden wie z.B.:

- Berechnung mit Finite Elemente Verfahren (FE)
- Handrechenformeln, z.B. für Balkenträger, Seile und Platten.

Es sollte beachtet werden, dass die berechneten Eigenfrequenzen von den realen, gemessenen aufgrund von getroffenen Annahmen über die Materialeigenschaften, die Komplexität des Tragwerks, der Aufbau und Ausstattung des Brückendecks sowie Geländer abweichen können.

I.A. wird empfohlen, die Masse der Fußgänger bei der Berechnung der Eigenfrequenzen zu berücksichtigen, wenn die modale Masse der Fußgänger mehr als 5% der modalen Masse des Brückendecks beträgt.

4.2 Schritt 2: Identifizierung kritischer Eigenfrequenzen

Die Gebrauchstauglichkeit einer Brücke mit Fußgängerverkehr sollte untersucht werden, wenn Eigenfrequenzen f_i in folgenden Bereichen liegen:

- bei Vertikal- und Längsschwingungen:

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 2,3 \text{ Hz}$$

- bei seitlichen Schwingungen:

$$0,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 1,2 \text{ Hz}$$

Bei Fußgängerbrücken mit Eigenfrequenzen der vertikalen und Längsschwingungen im Bereich von

$$2,5 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$$

ist es im Prinzip möglich, dass durch die 2. Harmonische der Fußgängerschrittfrequenz Resonanzeffekte auftreten. In diesem Fall vergrößert sich das Frequenzband für die kritischen für die Eigenfrequenzen der vertikalen und Längsschwingungen auf:

$$1,25 \text{ Hz} \leq f_i \leq 4,6 \text{ Hz}$$

Seitliche Schwingungen sind von diesen Effekt nicht betroffen.

Anmerkung: Es ist theoretisch möglich, dass vertikale Schwingungen durch die zweite harmonische der Schrittfrequenz auftreten. Bis heute ist jedoch in der Literatur kein Hinweis darauf zu finden, dass aufgrund dieses Effektes wesentliche Schwingungen aufgetreten sind.

4.3 Schritt 3: Wahl der Bemessungssituation

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit einer Fußgängerbrücke beginnt mit der Festlegung der wesentlichen Bemessungssituationen. Eine Bemessungssituation

wird mit einer erwarteten Verkehrsklasse (siehe Abschnitt 0) und einer gewählten Komfortklasse (siehe Abschnitt 4.3.2) beschrieben.

Bemessungssituationen können z.B. den täglichen Verkehr (einige Pendler passieren die Brücke täglich) oder Verkehr, der nur einmal im Leben eines Fußgängerbrücke auftritt, beschreiben. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über einige typische Verkehrssituationen auf Fußgängerbrücken gibt. Der erwartete Typ des Fußgängerverkehrs sowie die Verkehrsdichte können das dynamische Brückenverhalten sowie die Mindestanforderungen an den Komfort wegen unterschiedlicher Empfindlichkeit deutlich beeinflussen.

Tabelle 4-1: Typische Verkehrssituation

	<p>Einzelne Fußgänger und kleine Gruppen Anzahl der Fußgänger: 11 Gruppengröße: 1-2 P Dichte: 0,02 P/m²</p> <p>Anmerkung: P = Personen</p>
	<p>Sehr schwacher Verkehr Anzahl der Fußgänger: 25 Gruppengröße: 1-6 P Dichte: 0,1 P/m²</p>
	<p>Schwacher Verkehr Hier: Anlässlich einer Veranstaltung Anzahl der Fußgänger: 60 Gruppengröße: 2-4 P Dichte: 0,2 P/m²</p>
	<p>Außergewöhnlich dichter Verkehr Hier: Anlässlich der Brückeneröffnung Dichte: > 1,5 P/m²</p>

Es wird empfohlen, verschiedene mögliche Bemessungssituationen festzulegen und diese zu untersuchen, und so einen Überblick über das dynamische Verhalten einer Brücke zu gewinnen. Beispiele für die Festlegung typischer Bemessungssituationen und zugehörige Komfortklassen gibt Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2: Beispiele für die Festlegung wesentlicher Bemessungssituationen

Bemessungssituation	Beschreibung	Verkehrsklasse (cf. 0)	Auftretenshäufigkeit	Komfortklasse (cf. 4.3.2)
1	Einweihung der Brücke	TC4	einmalig	CL3
2	Berufsverkehr	TC2	täglich	CL1
3	Wochenendspaziergänger	TC1	wöchentlich	CL2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

4.3.1 Schritt 3a: Bestimmung der Verkehrsklassen

Fußgängerverkehrsklassen und die zugehörigen Dichten der Fußgängerströme sowie Merkmale des Verkehrs werden in Tabelle 4-3 angegeben.

Tabelle 4-3: Verkehrsklassen und Fußgängerdichten für Fußgängerbrücken

Verkehrsklasse	Dichte d (P = Personen)	Beschreibung	Merkmale
TC 1*)	Gruppe: 15 P; $d=15 P / (B L)$	Sehr schwacher Verkehr	
TC 2	$d = 0,2 P/m^2$	Schwacher Verkehr 	Komfortables freies Gehen Überholen ist möglich Einzelne Fußgänger können sich frei den Weg suchen
TC 3	$d = 0,5 P/m^2$	Dichter Verkehr 	Weiterhin freies Gehen möglich. Überholen kann zeitweise eingeschränkt sein.
TC 4	$d = 1,0 P/m^2$	Sehr dichter Verkehr 	Freies Gehen ist eingeschränkt. Überholen ist nicht mehr möglich.

Verkehrsklasse	Dichte d (P = Personen)	Beschreibung	Merkmale
TC 5	$d = 1,5 P/m^2$	Außergewöhnlich dichter Verkehr	Unangenehmes Gehen. Es wird gedrängt. Schrittfrequenzen können nicht frei gewählt werden.

*) Ein äquivalenter Personenstrom für Verkehrsklasse TC1 wird berechnet, indem die Anzahl der Personen durch Länge der Brücke L und Breite des Brückendecks B geteilt wird.

Gruppenformationen, Prozessionen und marschierende Soldaten werden in den Verkehrsklassen nicht berücksichtigt. Diese Lastfälle müssen ggf. gesondert untersucht werden.

4.3.2 Schritt 3b: Bestimmung der Komfortklassen

Als Kriterium für den Komfort auf schwingenden Fußgängerbrücken wird üblicherweise die Beschleunigung verwendet. Die vier in dieser Bemessungshilfe verwendeten Komfortklassen (Comfort Classes – CL) werden in Tabelle 4-4 beschrieben.

Tabelle 4-4: Definierte Komfortklassen mit üblichen Bandbreiten für die Beschleunigung

Komfortklasse	Grad des Komforts	Vertikal a_{limit}	Seitlich a_{limit}
CL 1	Maximum	$< 0,50 \text{ m/s}^2$	$< 0,10 \text{ m/s}^2$
CL 2	Mittel	$0,50 - 1,00 \text{ m/s}^2$	$0,10 - 0,30 \text{ m/s}^2$
CL 3	Minimum	$1,00 - 2,50 \text{ m/s}^2$	$0,30 - 0,80 \text{ m/s}^2$
CL 4	Nicht akzeptabel	$> 2,50 \text{ m/s}^2$	$> 0,80 \text{ m/s}^2$

Die hier angegebenen Bandbreiten behandeln ausschließlich Komforteigenschaften. Für den Lock-in Effekt werden in Abschnitt 4.6 gesonderte Werte angegeben.

4.4 Schritt 4: Abschätzung der Dämpfung

Bei der Bestimmung der Amplituden eines durch Fußgänger angeregten Systems spielt die Dämpfung eine besondere Rolle, da sie im Resonanzfall die Amplitude der Schwingung begrenzt. Bei der Dämpfung handelt es sich um Energiedissipation. Sie ist eine stark streuende Größe und wird von der Art der Baustoffe, durch lokale Wirkung von Auflagern und durch eingebaute Dämpfer beeinflusst. Die Dämpfung kann durch Brückenbeläge, Geländer und andere Ausbaurichtungen erhöht werden.

Allgemein hängt unter anderem die Höhe der Dämpfung von der Größe der Schwingungsamplitude ab, da mit zunehmender Schwingungsamplitude häufig die Reibung zwischen Bauteilen und Teilen des Brückenausbaus sowie in den Auflagern ansteigt.

Durch gleichzeitige Auftreten verschiedener Mechanismen der Energiedissipation in einem Bauwerk ist die Dämpfung ein komplexes Phänomen, das nur nach Fertigstellung und Ausrüstung der Brücke (mit Geländer, etc.) zuverlässig durch Messungen bestimmt werden kann.

Nachgiebige und leichte Fußgängerbrücken besitzen zusätzlich eine gewisse Sensibilität für Windeinwirkungen, die zu der sogenannten aerodynamischen Dämpfung führt. Diese zusätzliche Dämpfung kann zum Beispiel bei Untersuchungen zur Windeinwirkung angesetzt werden, nicht aber bei der Berechnung fußgängerinduzierter Schwingungen.

4.4.1 Dämpfungsmodell

Für die Bemessung und die numerische Berechnung von dynamischen Tragwerksantworten muss die Dämpfung durch ein Modell abgebildet und die entsprechenden Eingabedaten definiert werden. Ein weit verbreiteter Ansatz ist die Annahme einer linear-viskosen Dämpfung, bei der die Kraft der Dämpfung proportional zur Änderung der Verschiebung (d.h. Geschwindigkeit) ist.

Dieser Ansatz führt zu einer linearen dynamischen Gleichung, deren Lösung einfach berechnet werden kann. Allerdings ist eine linear-viskose Dämpfung nur eine Näherung des tatsächlichen Dämpfungsverhaltens des Bauwerks für kleinere Amplituden.

Der Einbau von Dämpfungssystemen (siehe Abschnitt 6.4.3) kann dazu führen, dass die Dämpfungsmatrix nicht mehr linear ist, so dass die übliche modale Berechnung der Bauwerksantwort nicht mehr möglich ist. Das Einstellen der Dämpfersysteme und die Berechnung der Systemantwort des gedämpften Systems erfordert dann aufwändigere Berechnungen auf Grundlage direkter (Zeit-)Integration oder durch andere Verfahren.

4.4.2 Dämpfungswerte unter Gebrauchslasten

Für den Nachweis des Komforts einer schwingenden Fußgängerbrücke, bei dem es sich im Sinne des Zuverlässigkeitskonzeptes der Eurocodes um einen Grenzzustand der Gebrauchtauglichkeit handelt, gibt Tabelle 4-5 Empfehlungen für Mindest- und Mittelwerte der Dämpfung an.

Tabelle 4-5: Werte für die kritische Dämpfung (Lehr'sches Dämpfungsmaß) in [%] für den Zustand der Gebrauchstauglichkeit für verschiedene Bauweisen

Bauweise	Minimum ξ	Mittelwert ξ
Stahlbeton	0,80%	1,3%
Spannbeton	0,50%	1,0%
Stahl-Beton-Verbundbauweise	0,30%	0,60%
Stahl	0,20%	0,40%
Holz	1,0%	1,5%
Spannband	0,70%	1,0%

4.4.3 Dämpfungswerte für große Amplituden

Bei leichten Brücken können vorsätzlich/mutwillig Schwingungen mit großen Amplituden hervorgerufen werden (Vandalismus), die eine größere Dämpfung aktivieren. Empfohlene Werte für große Amplituden sind in Tabelle 4-6 zusammengestellt.

Tabelle 4-6: Werte für die kritische Dämpfung in [%] bei großen Schwingamplituden für verschiedene Bauweisen

Bauweise	Dämpfung ξ
Stahlbeton	5,0%
Spannbeton	2,0%
Stahl, geschweißt	2,0%
Stahl, geschraubt	4,0%
Bewehrtes Elastomer	7,0%

4.5 Schritt 5: Berechnung der Beschleunigung

Nachdem die Bemessungssituationen (siehe Abschnitt 4.3) und die entsprechenden Werte für die Dämpfung (siehe Abschnitt 4.4) festgelegt wurden, wird im nächsten Bemessungsschritt für jede Bemessungssituation die maximale Beschleunigung a_{\max} ermittelt.

Die Beschleunigung einer Brücke kann mit verschiedenen Verfahren berechnet werden. Diese Bemessungshilfe empfiehlt die Anwendung eines der in Bild 4-1 genannten Verfahren, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.

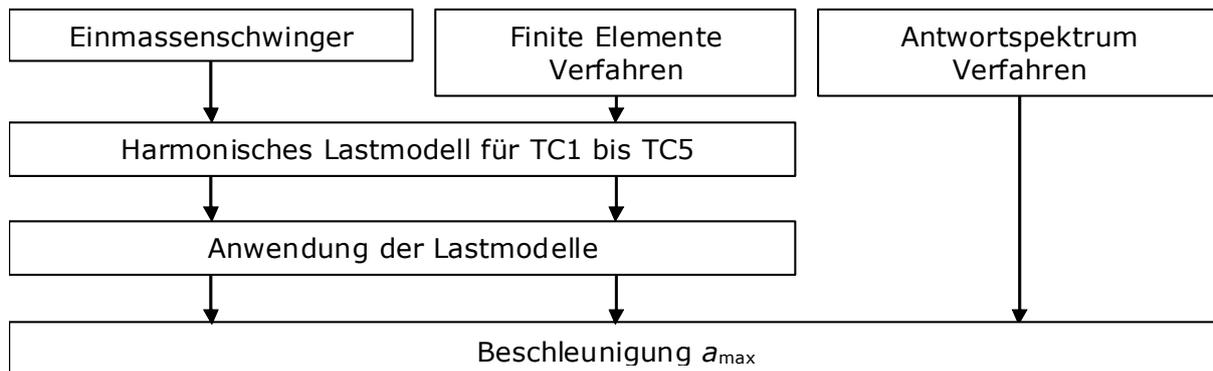


Bild 4-1: Verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Beschleunigung

Anmerkung: Da die Erfahrung zeigt, dass es sehr schwierig ist, die Dämpfung einer fertig gestellten Brücke vorherzusagen, wird bei kritischen Brücken empfohlen, an der fertiggestellten Brücke die angenommenen Dämpfungswerte mit Messungen zu überprüfen (siehe Abschnitt 5). Da die Dämpfung großen Streuungen unterliegt, können somit auch die Beschleunigungswerte streuen.

4.5.1 Harmonische Lastmodelle für Fußgänger

4.5.1.1 Äquivalente Fußgängeranzahl für Fußgängerströme

Nachdem ein (numerisches) Modell der Brücke für die Berechnung erstellt, die Bemessungssituation mit dem entsprechenden Lastmodell gewählt und Werte für die Dämpfung festgelegt wurden, kann die Antwort der Brücke berechnet werden. Die Berechnung eines Personenstroms aus n "zufällig" auftretenden Personen kann durch einen idealisierten äquivalenten Strom aus n' vollständig synchronisierten Personen abgebildet werden (siehe Bild 4-2). In diesem idealen Strom sind ausschließlich die Personen untereinander synchronisiert und nicht mit der Brücke (die Möglichkeit, dass die schwingende Brücke einen Einfluss auf die Schrittfrequenz nehmen kann wird nicht berücksichtigt). Den beiden Fußgängerströmen wird unterstellt, dass sie die gleichen Effekte auf der Brücke hervorrufen, wobei der äquivalente Personenstrom deterministisch als harmonische Belastung abgebildet werden kann. Die Beschleunigungen können mit Finiten Elementen (FE) oder mit dem Einmassenschwinger (SDOF) berechnet werden (siehe Abschnitt 4.5.1.3).

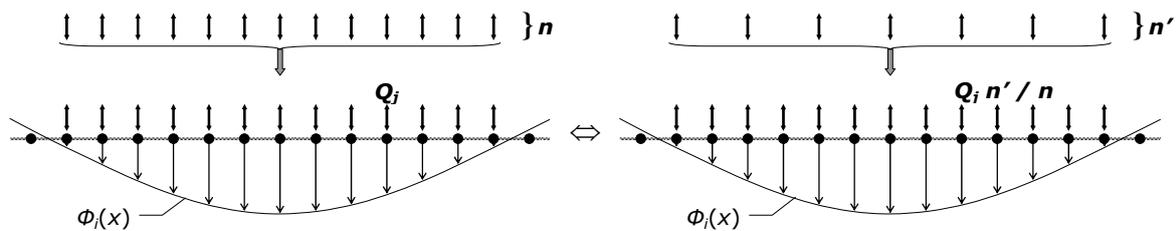


Bild 4-2: Äquivalente Fußgängerströme

Die verteilte harmonische Belastung auf dem Brückendeck, die eine äquivalente Anzahl Fußgänger an festgelegten Positionen darstellt, erfüllt die Anforderungen an die praktische Bemessung von Fußgängerbrücken bei Belastung mit Fußgängergruppen oder -strömen.

Der Frequenzbereich, in dem dieses Verfahren angewendet wird, sollte sorgfältig ausgewählt werden. Schließlich wird der Effekt, dass die Brückenschwingung das Verhalten von Fußgängern ungünstig beeinflussen kann, vernachlässigt.

4.5.1.2 Anwendung von Lastmodellen

Für jede Verkehrsklasse TC 1 bis TC 5 werden harmonische Lasten bestimmt (siehe Tabelle 4-3). Entsprechend der Dichte des Fußgängerstroms gibt es zwei verschiedene Ausdrücke zur Berechnung der äquivalenten Anzahl Fußgänger:

- Ausdruck 1 für TC1 bis TC3 (Dichte $d < 1,0 \text{ P/m}^2$)
- Ausdruck 2 für TC4 und TC5 (Dichte $d \geq 1,0 \text{ P/m}^2$)

Beide Lastmodelle bestehen aus einer gleichmäßig verteilten harmonischen Flächenlast $p(t)$ [N/m^2], die den äquivalenten Fußgängerstrom abbilden:

$$p(t) = P \times \cos(2\pi f_s t) \times n' \times \psi \quad \text{Eq. 4-1}$$

dabei ist:

$P \times \cos(2\pi f_s t)$ harmonische Belastung durch einen Fußgänger,

P Anteil der Last infolge eines Fußgängers, der mit der Schrittfrequenz f_s geht,

f_s Schrittfrequenz, von der angenommen wird, dass sie mit der untersuchten Brückeneigenfrequenz identisch ist,

n' äquivalente Anzahl von Fußgängern auf der belasteten Brückenfläche S (95% Fraktilwert),

S belastete Fläche des Brückendecks,

ψ Abminderungsfaktor, mit dem die Möglichkeit abgebildet wird, dass die Schrittfrequenz in den Bereich der untersuchten Eigenfrequenz der Brücke fällt.

Die Lastamplitude eines Einzelfußgängers P , die äquivalente Anzahl von Fußgängern n' (95% Fraktilwert) und der Abminderungsfaktor ψ werden in Tabelle 4-7 für die erste und zweite harmonische der Schrittfrequenzen (siehe Abschnitt 4.2) angegeben.

Tabelle 4-7: Parameter für die Verkehrsklasse

P [N]		
Vertikal	Längs	Seitlich
280	140	35
Abminderungsfaktor ψ		
Vertikal und längs		Seitlich

Äquivalente Anzahl n' von Fußgängern auf der belasteten Brückenfläche S , je nach Verkehrsklasse:

$$\text{TC1 bis TC3} \quad (\text{Dichte } d < 1,0 \text{ P/m}^2): \quad n' = \frac{10,8\sqrt{\xi \times n}}{S} \quad [1/\text{m}^2]$$

$$\text{TC4 und TC5} \quad (\text{Dichte } d \geq 1,0 \text{ P/m}^2): \quad n' = \frac{1,85\sqrt{n}}{S} \quad [1/\text{m}^2]$$

dabei ist ξ Dämpfung (Lehr'sches Dämpfungsmaß) und

n die Anzahl Fußgänger auf der belasteten Brückenfläche S
($n = S \times d$).

Das Lastmodell für Fußgängergruppen (TC1) geht davon aus, dass sich die Fußgänger auf der Brücke frei bewegen können. Daher ist die Synchronisation der Fußgänger untereinander wie bei einem Fußgängerstrom geringer Dichte. Im Falle großer Fußgängerdichten (TC4 und TC5) wird das Gehen behindert. Die Vorwärtsbewegung des Stroms wird langsamer und die Synchronisation der Fußgänger untereinander nimmt zu. Bei mehr als $1,5 \text{ P/m}^2$ wird das Gehen unmöglich, so dass dynamischen Einwirkungen deutlich abnehmen.

Bild 4-3 zeigt, wie die harmonische Belastung $p(t)$ auf ein Tragwerk bei Untersuchung einer bestimmten Schwingungsform angenommen wird.

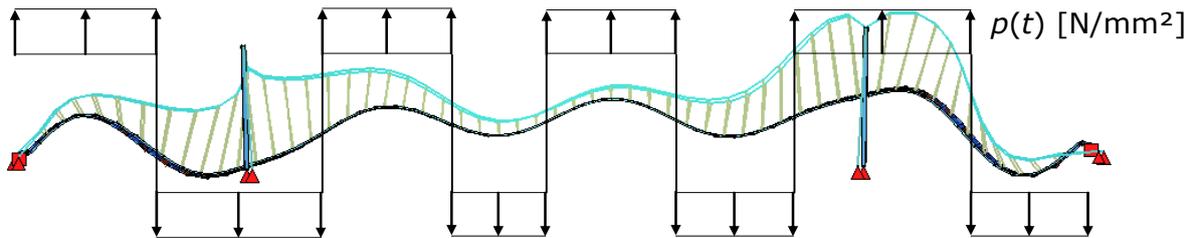


Bild 4-3: Ansatz einer harmonischen Belastung auf einer Schwingungsform $\Phi(x)$ (Vorzeichen der Last stimmt mit Vorzeichen der Modalform überein)

Die oben angegebenen Lastmodelle beschreiben die Lasten, die durch Fußgängerströme hervorgerufen werden. Einige Fußgängerbrücken können zusätzlich durch Jogger angeregt werden. Dieser Fall wird in [1] weiter erläutert.

4.5.1.3 Einmassenschwinger (SDOF-Verfahren)

Allgemein kann das dynamische Verhalten eines Tragwerks durch modale Berechnungen bestimmt werden. Dabei wird das Schwingungsverhalten des Tragwerks durch eine Kombination verschiedener harmonischer Schwingungen in den Eigenfrequenzen des Tragwerks beschrieben. So kann das Tragwerk in mehreren äquivalente Feder-/Masse-System mit jeweils nur einem Freiheitsgrad (Einmassenschwinger), transformiert werden.

Jeder Einmassenschwinger hat nur einen Freiheitsgrad (Single Degree of Freedom - SDOF), siehe Bild 4-4, und die Eigenfrequenz und modale Masse der betrachteten Schwingungsform.

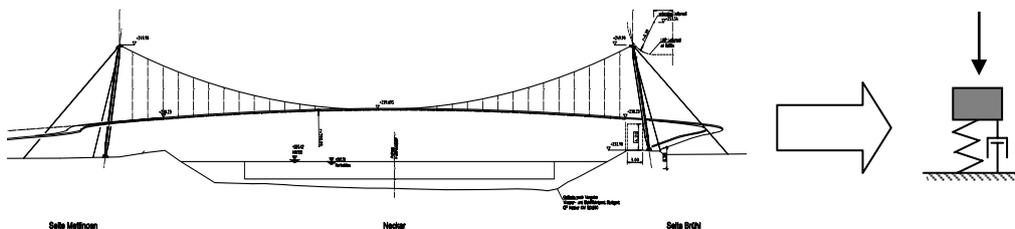


Bild 4-4: Äquivalenter Einmassenschwinger (SDOF) für eine Eigenfrequenz/Eigenform

Für die Bemessung kann für jede Eigenform mit einer Eigenfrequenz im kritischen Frequenzbereich mit dem Einmassenschwinger die zugehörige maximale Beschleunigung berechnet werden:

$$a_{\max} = \frac{p^* \pi}{m^* \delta} = \frac{p^*}{m^*} \frac{1}{2\xi} \quad \text{Eq. 4-2}$$

dabei ist p^* generalisierte Last (modale Last), zur Bestimmung der generalisierten Last siehe Hintergrundbericht [1],
 m^* generalisierte Masse / modale Masse
 ξ die Systemdämpfung und
 δ das logarithmische Dämpfungsdekrement

4.5.2 Antwortspektrumverfahren für Fußgängerströme

Nicht in jedem Fall ist es erforderlich, eine Zeitschrittberechnung für die Bemessung durchzuführen.

Das Antwortspektrumverfahren erfasst die stochastische Belastung und Systemantwort auf eine einfache Weise, so dass man Bemessungswerte mit einem bestimmten Vertrauensgrad erhält.

Dabei liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- die mittlere Schrittfrequenz $f_{s,m}$ des Fußgängerstroms stimmt mit der untersuchten Eigenfrequenz der Brücke f_i überein,
- die Brückenmasse ist gleichmäßig verteilt.
- die Schwingungsformen sind sinusförmig,
- die Moden sind voneinander unabhängig,
- das Tragverhalten ist linear-elastisch, die Dämpfung ist linear-viskos.

Der Bemessungswert ist der Spitzenwert der Beschleunigung. Beim Nachweis wird diese Beschleunigung mit der Beschleunigung der entsprechenden Komfortklasse verglichen.

Für verschiedene Dichten von Fußgängerströmen kann mit Hilfe der nachstehenden Gleichungen und Tabellen die charakteristische Beschleunigung berechnet werden, die dem 95 % Fraktilwert der maximalen Beschleunigung entspricht.

Diese maximale Beschleunigung ist das Produkt eines Spitzenfaktors $k_{a,d}$ und der Standardabweichung der Beschleunigung σ_a :

$$a_{\max,d} = k_{a,d} \sigma_a \quad \text{Eq. 4-3}$$

Anmerkung: Der Spitzenfaktor $k_{a,d}$ dient dazu, mit Hilfe der Standardabweichung σ_a , den charakteristischen Wert $a_{\max,d}$ zu ermitteln.

Beide Faktoren wurden für zahlreiche Fußgängerdichten und Brückeneigenschaften mit Monte-Carlo-Simulationen ermittelt.

Das Ergebnis ist ein empirischer Ausdruck zur Berechnung der Varianz der Beschleunigungsantwort:

$$\sigma_a^2 = k_1 \xi^{k_2} \frac{C \sigma_F^2}{m_i^2} \quad \text{Eq. 4-4}$$

Dabei ist $k_1 = a_1 f_i^2 + a_2 f_i + a_3$

$$k_2 = b_1 f_i^2 + b_2 f_i + b_3$$

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ Konstanten

f_i die untersuchte Eigenfrequenz der Brücke, die mit der mittleren Schrittfrequenz des Fußgängerstroms zusammen fällt,

ξ Dämpfung (Lehr'sches Dämpfungsmaß),

C Konstante, die das Maximum des Lastspektrums angibt



$$\sigma_F^2 = k_F n \quad \text{Varianz der Last (aus Fußgängern)}$$

$$k_F \quad \text{Konstante}$$

$$n = d \times L \times B \quad \text{die Anzahl der Fußgänger auf der Brücke}$$

(d : Fußgängerdichte, L : Brückenlänge, B : Brückenbreite)

$$m_i^* \quad \text{modale Masse der untersuchten Schwingungsform } i$$

Die Konstanten a_1 bis a_3 , b_1 , b_3 , C , k_F und $k_{a,95\%}$ werden für vertikale Beschleunigungen in Tabelle 4-8 und für seitliche Beschleunigungen in Tabelle 4-9 angegeben.

Tabelle 4-8: Konstanten für vertikale Beschleunigungen

d [P/m ²]	k_F	C	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	$k_{a,95\%}$
$\leq 0,5$	$1,20 \times 10^{-2}$	2,95	-0,07	0,60	0,075	0,003	-0,040	-1,000	3,92
1,0	$7,00 \times 10^{-3}$	3,70	-0,07	0,56	0,084	0,004	-0,045	-1,000	3,80
1,5	$3,34 \times 10^{-3}$	5,10	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,060	-1,005	3,74

Tabelle 4-9: Konstanten für seitliche Beschleunigungen

d [P/m ²]	k_F	C	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	$k_{a,95\%}$
$\leq 0,5$	$2,85 \times 10^{-4}$	6,8	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,06	-1,005	3,77
1,0		7,9	-0,08	0,44	0,096	0,007	-0,071	-1,000	3,73
1,5		12,6	-0,07	0,31	0,120	0,009	-0,094	-1,020	3,63

Auf Grundlage des gleichen Verfahrens kann auch vereinfachend die erforderliche modale Masse für das Erreichen einer vorgegebenen Komfortgrenze a_{limit} bei gegebener Personenanzahl berechnet werden:

$$m_i^* \geq \frac{\sqrt{n} (k_1 \xi^{k_2} + 1.65 k_3 \xi^{k_4})}{a_{\text{limit}}}$$

Dabei ist m_i^* modale Masse für die untersuchte Schwingungsform i ,

n Anzahl der Fußgänger auf der Brücke,

ξ Dämpfung,

k_1 bis k_4 Konstanten, siehe Tabelle 4-10 bzw. Tabelle 4-11

Tabelle 4-10: Konstanten für die erforderliche vertikale modale Masse

d [P/m ²]	k_1	k_2	k_3	k_4
$\leq 0,5$	0,7603	0,468	0,050	0,675
1,0	0,5700		0,040	
1,5	0,4000		0,035	

Tabelle 4-11: Konstanten für die erforderliche seitliche modale Masse

d [P/m ²]	k_1	k_2	k_3	k_4
$\leq 0,5$	0,1205	0,45	0,012	0,6405
1,0				
1,5				

Das Bemessungsverfahren wurde unter Verwendung Mehrfeldträgern mit sinusförmigen Modalformen entwickelt. Falls die Eigenformen wesentlich von den eines Einfeld- oder Mehrfeldträgers abweicht, können die Anwendungsgrenzen des spektralen Verfahrens erreicht werden.

4.6 Schritt 6: Überprüfung des seitlichen Lock-in-Risikos

Die kritische Anzahl Fußgänger, die auf einer Brücke den seitlichen lock-in und damit eine deutliche Zunahme der seitlichen Amplituden verursachen, kann mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$N_L = \frac{8 \pi \xi m^* f}{k} \quad \text{Eq. 4-5}$$

dabei ist

- ξ kritische Dämpfung (Lehr'sches Dämpfungsmaß)
- m^* modale Masse der betrachteten Eigenform
- f Eigenfrequenz der betrachteten Eigenform
- k Konstante (etwa 300 Ns/m bei Eigenfrequenzen zwischen 0,5-1,0 Hz).

Alternativ kann eine Grenzamplitude der Beschleunigung als Kriterium betrachtet werden, bei der mit seitlichem lock-in gerechnet werden kann:

$$a_{lock\ in} = 0,1 \text{ to } 0,15 \text{ m/s}^2 \quad \text{Eq. 4-6}$$

Aktuelle Versuche zeigen, dass beide Formeln geeignet sind, das Einsetzen des lateralen lock-in abzuschätzen.

Anmerkung: Ein Synchronisierungseffekt bei vertikalen Schwingungen konnte bisher auf Fußgängerbrücken mit Fußgängerströmen nicht festgestellt werden.

4.7 Schritt 7: Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Als letzten Schritt im Flussdiagramm dieser Bemessungshilfe wird die ermittelte Beschleunigung mit den Anforderungen aus der Komfortklasse, siehe Tabelle 4-4, verglichen. Werden die Anforderungen nicht eingehalten, d.h. der Komfort ist nicht gewährleistet, können folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Veränderung der Brückenmasse,
- Veränderung der Frequenz,
- Erhöhung der Strukturdämpfung,
- Einbau zusätzlicher Dämpfer.

Bei einer bereits bestehenden Brücke ist die Modifizierung der Dämpfung die einfachste Sanierungsmaßnahme. Die Dämpfung kann zum einen durch den Einbau von Dämpfern zum anderen auch durch die Aktivierung der Dämpfung in Ausbauten (z.B. Geländer) erreicht werden.

5 Bewertung der dynamischen Brückeneigenschaften

5.1 Einführung

Die experimentelle Untersuchung des dynamischen Brückenverhaltens kann ein wichtiger Bestandteil der Brückenplanung sein. Dabei können anhand des Aufwandes zwei Stufen unterschieden werden:

- **Stufe 1-** Bestimmung der dynamischen Bauwerkseigenschaften wie Eigenfrequenzen, Schwingungsformen und Dämpfungseigenschaften zur Kalibrierung numerischer Modelle und ggf. für die Auslegung schwingungsdämpfender Maßnahmen.;
- **Stufe 2-** Messung der dynamischen Brückenantwort unter Anregung durch Personen zur Bewertung des Komforts und/oder der Übereinstimmung mit Simulationsberechnungen.

Die Wahl einer der oben angegebenen Stufen hängt von den Eigenschaften der Brücke und dem Ziel der Untersuchung ab.

Untersuchungen der **Stufe 2** sind Standarduntersuchung, die nach Fertigstellung einer möglicherweise schwingungsanfälligen Brücke zur Auslegung und Überprüfung durchgeführt werden sollten. Anhand dieser Messergebnisse kann der Brückenbetreiber entscheiden, ob es erforderlich ist, die Schwingungen durch entsprechende Bauelemente zu reduzieren. Es ist wichtig, dass bei der Überprüfung der Komfortklasse einer Brücke alle Schwingungsphänomene erfasst werden, die der Aufstellung der Bemessungslasten zugrunde lagen, so dass die charakteristische Schwingungsantwort gemessen wird.

Untersuchungen der **Stufe 1** werden durchgeführt, wenn sicher ist, dass der Komfort auf der Brücke nicht erfüllt ist und Bauelemente zur Schwingungskontrolle erforderlich sind.

In diesem Abschnitt werden allgemeine Angaben zur Vorgehensweise bei experimentellen Untersuchungen und zur Auswertung der Messdaten erläutert.

5.2 Messung der Schwingungsantwort

Bei Untersuchungen der **Stufe 2** sind folgende Punkte zu beachten:

1. Bestimmung der kritischen Eigenfrequenzen;
2. Ermittlung der Dämpfung;
3. Messung der Schwingungen infolge eines einzelnen Fußgängers;
4. Messung der Schwingungen infolge einer Gruppe von Fußgängern;
5. Messung der Schwingung infolge eines Fußgängerstroms.

Die Überprüfung der Akzeptanz der Schwingungen einer Fußgängerbrücke sollte unter Berücksichtigung des Nutzungsprofils der Brücke während der Messungen erfolgen.

5.2.1 Messung der Grundschrwingungen und Bestimmung der kritischen Eigenfrequenzen

Bei den Messungen sollte die Brücke für den Fußgängerverkehr gesperrt werden. Die Messaufnehmer sollten an den Stellen platziert werden, an denen die maximalen Auslenkungen bei Schwingungen im kritischen Frequenzbereich erwartet werden. Es sollte also eine dynamische Vorberechnung der Brücke erfolgen.

5.2.2 Abschätzung der Dämpfung für kritische Eigenfrequenzen

Die Abschätzung der Dämpfung bei Schwingungen in einer kritischen Schwingungsform kann dadurch erfolgen, dass eine einzelne Person durch rhythmisches Springen, Kniebeugen oder Rütteln an einer bestimmten Stelle der Brücke in der entsprechenden Eigenfrequenz versucht, die Brücke in Resonanz aufzuschaukeln. Nach einigen Belastungszyklen (wenn stationäre Schwingungen erreicht sind) stellt die Person die Anregung plötzlich ein und es wird das freie Ausschlagen der Brücke gemessen. Dieser Vorgang sollte einige Male wiederholt werden, damit eine durchschnittliche Dämpfung als Funktion der Schwingungsamplitude bestimmt werden kann:

5.2.3 Messungen der durch einen Fußgänger verursachten Schwingungen

Die oben beschriebenen Untersuchungen liefern genauere Werte der zuvor berechneten kritischen Eigenfrequenzen. Nun wird die Schwingungsantwort an den maßgebenden Stellen der Brücke (maximale Amplitude der jeweiligen kritischen Frequenz) gemessen; wobei eine Person über die Brücke geht.

Es sollten verschiedene Arten der Fußgängerfortbewegung in Abhängigkeit der kritischen Eigenfrequenzen untersucht werden:

- Gehen, für kritische Eigenfrequenzen unter 2,5 Hz;
- Gehen oder Laufen, für kritische Eigenfrequenzen zwischen 2 Hz und 3 Hz;
- Laufen, für kritische Eigenfrequenzen über 3 Hz.

Wegen der nicht vermeidbaren Zufälligkeit dieser Anregung sollten mehrere Messungen, z.B. 5, für jede Kombination von Bewegungsart und Frequenz durchgeführt werden. Um das Gehen mit einer bestimmten konstanten Schrittfrequenz zu erleichtern, sollte ein Metronom verwendet werden. Von jeder Messung sollte die maximale Beschleunigung und dynamische Verschiebung aufgezeichnet werden (die Verschiebung kann auch durch zweifache Integration der Beschleunigung ermittelt werden). Von allen gemessenen maximalen Beschleunigungen ist die größte maßgebend. Ebenfalls sollte das Gewicht der Versuchsperson notiert werden. Bei geneigten Brückendecks sollten die Schwingungen beim Abwärtsgehen gemessen werden.

5.2.4 Messungen der durch Fußgängergruppen verursachten Schwingungen

Die Schwingungen sollte unter zwei Randbedingungen gemessen werden:

- normales Gehen / Laufen einer Gruppe und
- Gehen / Laufen einer Gruppe mit dem Ziel, große Schwingungen zu provozieren (Vandalismus).

Die Referenzgruppengröße besteht aus 10 Personen bei Brückendeckbreiten von weniger als 2,5 m; bei großen Deckbreiten aus 15 Personen. Die Messungen sollten unter Beachtung der in 5.2.3 Anmerkungen zum Überqueren der Brücke erfolgen. Untersuchungen zum Einfluss einer synchronisierten Gruppe sollten mit einem Metronom erfolgen, um das Synchronisieren zu vereinfachen.

Vorausgesetzt, dass die Anwesenheit von Personen die Dämpfung erhöht und die Dämpfung mit zunehmender Schwingungsamplituden zunimmt, wird empfohlen, das Ausschlagen der Brücke nach einer Resonanzanregung der Gruppe, z.B. durch Springen auf einer festgelegten Stelle, zu messen.

5.2.5 Messung der durch Fußgängerströme verursachten Schwingungen

Die Messung der Auswirkung von Fußgängerströmen ist für die Untersuchung des Schwingungsverhaltens unter verschiedener Fußgängereinwirkungen vor allem von Interesse, wenn die Brücke insbesondere im Hinblick auf Synchronisation von Fußgängern und Brücken schwingungsanfällig ist. Bei den Messungen wird wie in den Abschnitten 5.2.3 für Einzelpersonen und 5.2.4 für Personengruppen vorgegangen.

5.3 Bestimmung der dynamischen Brückeneigenschaften

Die Bestimmung der modalen Größen wie Eigenfrequenzen, Schwingungsform und Dämpfung erfolgt nach den oben beschriebenen Verfahren der **Stufe 1**. Entsprechend können auch übliche Verfahren mit Zwangserregung und alternativ auch mit freien oder ambienten Schwingungen zur Bestimmung der modalen Eigenschaften verwendet werden. Die grundlegenden Größen der Versuche werden für beide Fälle in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

5.3.1 Untersuchungen unter Zwangserregung

Messungen unter Zwangserregung stellen die traditionelle Art der Schwingungsanalyse dar und liefern unter der Voraussetzung, dass die Zwangserregung und die Messwerte qualitativ gut sind, die genauesten Ergebnisse. Das gilt vor allem für die Bestimmung der Dämpfung, deren Qualität in großem Maße von Messgenauigkeiten abhängt. Die Art der Bestimmung der Dämpfung hängt von der Art der Zwangserregung ab. Es besteht allerdings die Gefahr, dass die eingebrachte Energie bei niedrigen Frequenzen klein ist, so dass das Verhältnis Messsignal zu Grundrauschen sehr klein sein kann.

Die Geräte für die Zwangserregung,

- Hammer und

- Shaker,
werden in Abschnitt 5.4.2.1 beschrieben.

5.3.2 Messung ambienter Schwingungen

Bei der Messung ambienter Schwingungen werden die einwirkenden Belastungen aus der Umgebung unter der Annahme herangezogen, dass ihre Amplituden im betrachteten Frequenzbereich in etwa konstant ist (weisses Rauschen). Obwohl diese Annahme nicht genau zutreffen muss, wurden die Messungen ambienter Schwingungen für die Bestimmung der modalen Eigenschaften im Bauwesen sehr interessant. Dies liegt im geringen Aufwand und der großen Genauigkeit der heute verfügbaren Sensoren begründet. Die mit diesem Verfahren bestimmten Dämpfungswerte unterliegen jedoch einer großen Streuung.

5.3.3 Messung freier Schwingungen

Unter der Messung der freien Schwingungen versteht man die Schwingungsantwort auf das Anzupfen mit vorgespannten Seilen oder anderen Anregungen. Sie entstehen dadurch, dass Bauteile aus ihrer Gleichgewichtslage ausgelenkt und dann losgelassen werden. Diese Verfahren können mit geringem Aufwand an der fertig gestellten Brücke ausgeführt werden und liefern für die angeregten Schwingungsformen Dämpfungswerte mit hoher Genauigkeit. In jedem Fall kann erwartet werden, dass die modalen Eigenschaften in besserer Qualität als durch Messung von ambienten Schwingungen bestimmt werden.

Es ist anzumerken, dass Messungen zur Bestimmung der Dämpfung bei Windgeschwindigkeiten unter 2-5 m/s durchgeführt werden sollten.

5.4 Messgeräte

5.4.1 Messaufnehmer

Beschleunigung ist die übliche Messgröße, da durch sie die Akzeptanzgrenzen für den Komfort von Fußgängern definiert sind.

Beschleunigungsaufnehmer erzeugen elektronische Signale in Relation zur Beschleunigung für bestimmte Frequenzbereiche. Sie funktionieren nach unterschiedlichen Arbeitsprinzipien. Für die meisten Fußgängerbrücken sind Frequenzen im Bereich von 0,5 – 20 Hz relevant. Daher sind übliche Spezifikationen für Beschleunigungsaufnehmer:

- Frequenzband (mit 5% Linearität): 0,1 – 50 Hz;
- Empfindlichkeit: 10 mV/g
- Amplitudenbereich: $\pm 0,5$ g

5.4.2 Geräte zur Kenngrößenerfassung

5.4.2.1 Geräte zur Zwangserregung

Für die Messung von zwangserregten Schwingungen kann die Anregung mit einem Hammer (siehe Bild 5-1) oder einem Shaker (siehe Bild 5-2) aufgebracht werden.

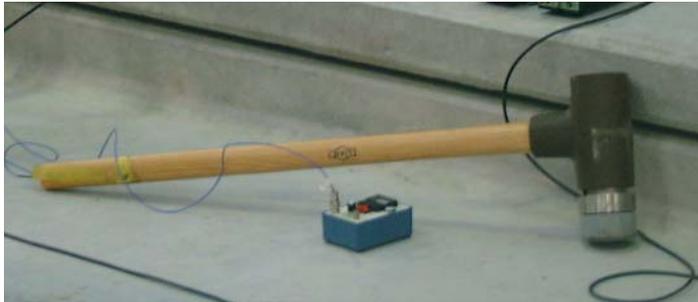


Bild 5-1: Hammer zur Schwingungsanregung im Bauwesen



Bild 5-2: Elektromagnetischer Shaker für das Bauwesen, vertikaler Aufbau

Anmerkung: Mehr Angaben zu diesen Geräten werden im Hintergrundbericht [1] gegeben.

5.4.2.2 Sensoren für die Lasteintragung

Ein wichtiger Punkt beim Messen an Fußgängerbrücken ist das Messen der Lasten, die durch Fußgänger verursacht werden, wenn sie alleine oder in Gruppen die Brücke überqueren.

Die direkte Bestimmung der lokalen Last durch einen Fußgänger kann durch die Verwendung einer Lauffläche mit Lastplatten erfolgen. Bei einer gehenden Gruppe von Fußgängern ist eine wichtige Größe die Synchronisation der Fußgänger, die durch Videoaufnahmen und Bildverarbeitung bestimmt werden kann.

6 Schwingungskontrolle

6.1 Einführung

Die mit dem Bemessungsverfahren nach Abschnitt 3 berechneten Schwingungsamplituden werden mit Komfortgrenzen verglichen. Wenn die Komfortgrenzen überschritten werden oder wenn ein lock-in Risiko besteht, sollte das dynamische Verhalten der Brücke verändert/modifiziert werden. Dies kann mit einer Veränderung der Masse, der Eigenfrequenz oder der Dämpfung erreicht werden.

6.2 Änderung der Masse

Bei sehr leichten Fußgängerbrücken kann durch z.B. Verwendung einer schweren Betonplatte als Brückendeck das dynamische Verhalten bei Fußgängeranregung verbessert werden, indem die modale Masse und damit die Massenträgheit erhöht wird. Es sollte allerdings nicht vernachlässigt werden, dass eine Erhöhung der modalen Masse mit einer Reduzierung der Eigenfrequenz einher geht.

Eine Erhöhung der Masse ist z.B. bei Spannbandkonstruktion zur Schwingungsreduktion geeignet .

6.3 Änderung der Frequenz

Die Änderung der Steifigkeit ist der konventionelle Weg, um Eigenfrequenzen im kritischen Frequenzbereich für vertikale und horizontale Fußgängerschrittfrequenzen zu vermeiden. Dieser würde dazu führen, dass die meisten leichten und zierlichen Brücken nicht gebaut werden können, weil gewisse Veränderungen der Steifigkeit k_i lediglich zu einem unterproportionalen Anstieg der Eigenfrequenz f_i , führen, da

$$f_i = \sqrt{\frac{k_i}{m^*}} .$$

Jedoch sollten während der Entwurfsphase einige einfache Maßnahmen betrachtet werden, die das dynamische Verhalten verbessern und damit auch die kritischen Eigenfrequenzen anheben können.

6.4 Erhöhung der Dämpfung

6.4.1 Einführung

Die Erhöhung der Dämpfung ist eine weitere Möglichkeit, die dynamischen Auswirkungen von Fußgängern auf Brücken zu reduzieren. Bei bereits fertig gestellten Brücken ist es außerdem die einfachste und effektivste Sanierungsmöglichkeit . Dies kann durch externe Dämpfer oder durch Elemente im Tragwerk, die z.B. durch Reibung Energie vernichten, erreicht werden.

Externe Dämpfer zur Reduzierung der Tragwerksschwingungen stellen häufig im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Kosten die beste Lösung dar. Diese Dämpfer verfügen über eine aktive, semi-aktive oder passive Steuerung. Passive Dämpfer werden aufgrund der Kosten, des Wartungsaufwands und der praktischen Erfahrung am häufigsten verwendet. Zu den passiven Dämpfern gehören viskose Dämpfer, abgestimmte Massendämpfer (TMD), Pendeldämpfer, abgestimmte Flüssigkeitssäulendämpfer (TLCD) und abgestimmte Flüssigkeitsdämpfer (TLD). Davon sind viskose Dämpfer und TMDs am weitesten verbreitet.

6.4.2 Einfache (konstruktive) Maßnahmen

Geländer werden i.A. nicht als Teil des Tragwerks betrachtet sondern alleine nach architektonischen und funktionalen Gesichtspunkten ausgewählt. Insbesondere bei schlanken Tragwerken können Geländer zur Steifigkeit und Dämpfung einer Brücke merklich beitragen. Z.B. kann ein Geländer aus Maschendrahtzaun zur Bauwerksdämpfung beitragen, da Reibung in den Kontaktflächen der Drähte aktiviert werden kann. Allerdings kann dieser Beitrag nicht in der Planungsphase quantifiziert werden, da er in hohem Maße von der Schwingungsamplitude abhängt.

In ähnlicher Weise können Elastomerlager und Brückenbeläge einen Anteil zur Dämpfung liefern. Es sollte aber beachtet werden, dass sich die Eigenschaften eines Elastomers mit der Zeit verändert und daher eine gute Wartung erforderlich ist.

6.4.3 Zusätzliche Dämpfer

In Tabelle 6-1 werden einige mit zusätzlichen Dämpfern ausgestattete Brücken aufgelistet und die Eigenschaften der eingebauten Dämpfersysteme und ihre Wirkung auf das Gesamtverhalten erläutert.

Tabelle 6-1: Fußgängerbrücken mit eingebauten Dämpfersystemen

Brücke	Anzahl der Brückenfelder / Länge [m]	Brückentyp	Kontrollierte Eigenfrequenzen [Hz]	Vorherrschende Schwingungsrichtung	verwendete Dämpferart	Auswirkung des Dämpfers auf das Gesamtverhalten
T-Bridge, Japan	2 Felder, 45+134	Schrägseil, durchlaufender Stahlkasten-träger	0,93	seitlich	Flüssigkeitsdämpfer nach dem Schwallprinzip innerhalb des Stahlkastens. Insgesamt 600 Behälter, Massenverhältnis von 0,7% der modalen Masse der seitlichen Träger-schwingung	Die seitliche Träger-schwingamplitude wurde von ca. 8,3mm auf 2,9mm reduziert.

Brücke	Anzahl der Brückenfelder / Länge [m]	Brückentyp	Kontrollierte Eigenfrequenzen [Hz]	Vorherrschende Schwingungsrichtung	verwendete Dämpferart	Auswirkung des Dämpfers auf das Gesamtverhalten
Millennium Bridge, London	3 Felder, 108+144+80	Hänge-Zugband-Brücke	Seitlich: 0,8 (hauptsächlich) 0,5 1,0 Vertikal: Frequenzen zwischen 1.2 und 2.0 Hz	Überwiegend seitlich	Viskose Hydraulikdämpfer und Massedämpfer zur Kontrolle seitlicher Bewegungen. Vertikale Massedämpfer zur Kontrolle der Vertikal-schwingung,	Schwingungen wurden nicht mehr wahrnehmbar
Forchheim Brücke, Germany	1 Feld, 117,5	Schräg-seilbrücke	1,0 bis 3,0	vertikal	1 TMD abgestimmt	
Solférino Bridge, Paris	Mittelfeld, 106	Bogen	0,81 1,94 2,22	seitlich vertikal vertikal	1 seitlicher TMD mit einer Masse von 15000kg und 2 vertikale TMDs mit Massen von 10000kg und 7600kg	Steigerung der Dämpfung von 0,4% auf 3,5% (seitlich) und von 0,5% auf 3% und 2% (vertikal)
Pedro e Inês Bridge, Coimbra	Mittelfeld, 110	Flacher Bogen / Träger	0,85 1,74; 1,80;2,34; 2,74; 3,07; 3,17	seitlich vertikal	6 seitliche TMDs von 14800kg und 6 vertikale TMDs	Steigerung der seitliche Dämpfung von 0,5% auf 4% und der vertikalen Dämpfung von 0,3%-2,2% auf 3%-6%

Anmerkung: Für weitere Informationen zu den im folgenden beschriebenen Dämpfern/Bauelementen wird auf den Hintergrundbericht verwiesen [1].

6.4.3.1 Viskose Dämpfer

Viskose Dämpfer (siehe Bild 6-1) werden eingesetzt, um Schwingungen durch Energiedissipation bei der Verformung von viskosen Flüssigkeiten oder Feststoffen zu reduzieren.

Eine weit verbreitete Bauweise besteht aus einem Kolben innerhalb eines Zylinders, der durch Bewegung Flüssigkeitsströmungen und -Verformungen auslöst, wodurch Energie in Wärme umgesetzt wird. Die Reaktionskraft dieser Dämpfer hängt von der Viskosität der Flüssigkeit ab und ist proportional zur Bewegungsgeschwindigkeit des Kolbens. Daher hängt der Wirkungsgrad des Dämpfers von der Möglichkeit ab, ihn so zu installieren, dass er Tragwerkspunkte miteinander verbindet, die zueinander große Relativgeschwindigkeit haben. Bei



manchen Bauweisen verursacht die Kolbenbewegung auch die Strömung der Flüssigkeit durch kalibrierte Öffnungen. Dieser Dämpfer ist weniger temperaturabhängig als der erstgenannte, dessen Wirkung ganz wesentlich durch die viskosen Eigenschaften der Flüssigkeit bestimmt wird.

Viskos-elastische Dämpfer verbrauchen Energie durch Schubverformungen eines Feststoffes, in der Regel ein Polymer.



Bild 6-1: Beispiel für einen installierten viskosen Dämpfer

6.4.3.2 Abgestimmte Massedämpfer (TMD)

Abgestimmte Massedämpfer (Englisch: „Tuned Mass Damper – TMD) bestehen aus Einzelmassen die mit dem Tragwerk über Federn und einem Dämpfer verbunden sind. Durch diese Dämpfer wird die kritische Eigenfrequenz in zwei neue Frequenzen – eine oberhalb und eine unterhalb der relevanten Bauwerksfrequenz – aufgeteilt. Durch die Relativbewegung zwischen Tragwerk und Masse kann Energie vernichtet werden. Die Masse des Tragwerks ist viel höher als die Masse des Dämpfers. Dadurch sind die Bewegungen der Dämpfermasse im Vergleich zur Tragwerksbewegung groß. Massedämpfer werden speziell für ihren Anwendungsfall frequenzmäßig abgestimmt. Beispiele für den Einbau vertikal wirkender und horizontal wirkender Massedämpfer zeigt Bild 6-2.



Bild 6-2: Beispiele für eingebaute Massedämpfer (TMDs)

6.4.3.3 Pendeldämpfer

Pendeldämpfer, wie in Bild 6-3 dargestellt, sind besondere Massendämpfer (TMD), die zur Kontrolle horizontaler Schwingungen verwendet werden. Der Hauptunterschied zu den Massendämpfern besteht darin, dass bei Frequenzen von weniger als 1 Hz keine Federn verwendet werden. Die Masse wird an Pendelstäben aufgehängt, um die Reibung im Vergleich zu einer horizontalen Lagerung zu reduzieren.

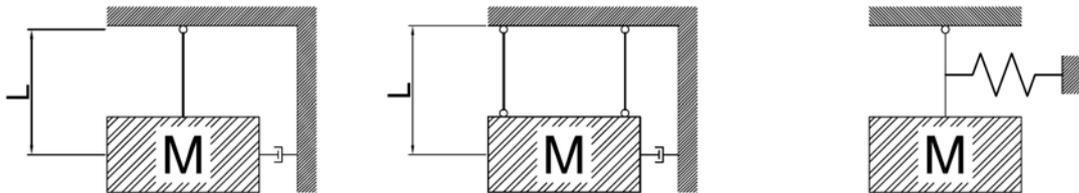


Bild 6-3: Beispiele für Pendelsysteme

6.4.3.4 Abgestimmter Flüssigkeitssäulendämpfer (TLCD)

Ein abgestimmter Flüssigkeitssäulendämpfer (Englisch: "Tuned Liquid Column Damper – TLCD") besteht aus einem U-förmigen Rohr, das mit einer Flüssigkeit (i.A. Wasser) gefüllt ist, siehe Bild 6-4. Dieser Dämpfer wird so eingestellt, dass die Kräfte infolge der Flüssigkeitsbewegung an der Unterseite des Rohres gegen die horizontale Bewegung wirken. Es ist das gleiche Wirkungsprinzip wie beim Massendämpfer (TMD). Flüssigkeitssäulendämpfer besitzen gegenüber anderen Dämpferbauweisen die Vorteile, dass Frequenz und Dämpfung einfach eingestellt werden können, dass sie leicht zu installieren sind, dass es eine einfache Konstruktion ist und die Wartungskosten sehr gering sind.

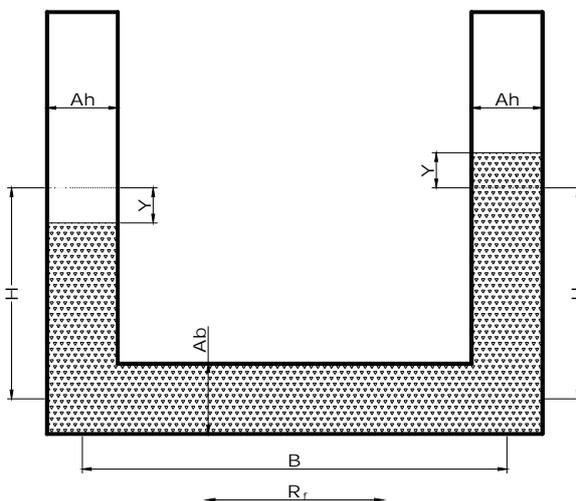


Bild 6-4: Modell eines TLCD

Die optimale Dämpfung eines TLCD sollte so groß wie die eines entsprechenden Massedämpfers sein. Durch Strömungsturbulenzen hat ein TLCD eine Eigendämpfung. Zusätzlich kann seine Dämpfungswirkung durch den Einbau von Klappen und Düsen erhöht werden. Zur Zeit existiert jedoch keine ausreichende technische Basis, um die quantitative Wirkung dieser Dämpfer vorweg zu bestimmen. Die Dämpfung muss daher immer durch die Messung am Prototypen ermittelt werden.

6.4.3.5 Abgestimmte Flüssigkeitsdämpfer (TLD)

Abgestimmte Flüssigkeitsdämpfer (Englisch: „Tuned Liquid Damper - TLD“) sind passive Schwingungsdämpfer, die aus einem flüssigkeitsgefüllten Behälter bestehen, siehe Bild 6-5. Sie werden zur Reduzierung horizontaler Tragwerksschwingungen verwendet. Vorteile wie der geringe Preis, die frühe Aktivierung, einfache Abstimmung mit Eigenfrequenzen und der einfache Einbau in bestehende Tragwerke haben die Anwendung dieser Dämpfer gefördert. Allerdings kann die Wirkung der Dämpfer durch das Brechen der Wellen äußerst nicht-linear sein.

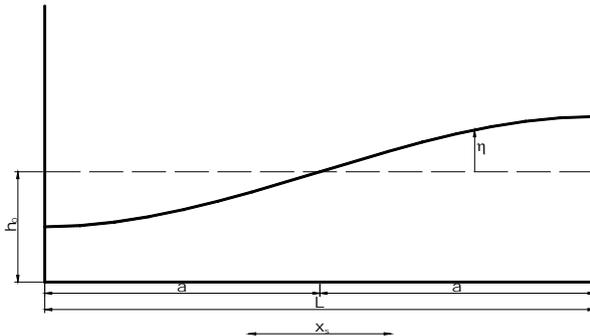


Bild 6-5: Modell eines TLD

7 Literatur

- [1] HiVoSS (Human induced Vibrations of Steel Structures): Design of Footbridges – Background document, May 2008.