

Schwingungen bei Fußgängerbrücken

- Inhalt:**
1. Einführung
 2. Normung Eurocode und DIN
 3. Erfahrungen mit Dämpfungs- und Beschleunigungswerten
 4. Überlegungen
 - zu den Grenzwerten
 - zur Ermüdung
 - zum Zusammenwirken Seil/Deck
 5. Literatur

Autorin: Dr.-Ing. Patricia Hamm
 Beratende Ingenieurin
 Ingenieurbüro für Baudynamik und
 Holzbau
 Marktoberdorf, D

1. Einführung

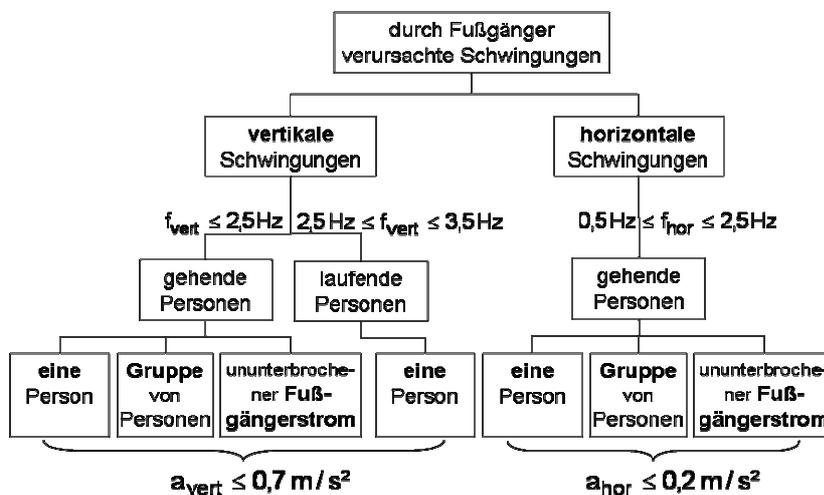
Fußgängerbrücken können durch Wind oder Fußgänger zu Schwingungen angeregt werden. In diesem Beitrag wird nur auf fußgängerinduzierte Schwingungen eingegangen. Diese werden sehr subjektiv wahrgenommen und beurteilt. Sind Erreger und Empfänger ein und dieselbe Person, werden die Schwingungen eher akzeptiert als im umgekehrten Fall: Z. B. wenn eine Person auf der Brücke verweilt und eine Gruppe von Joggern die Brücke zu Schwingungen anregt. Ein weiterer Punkt, weshalb Schwingungen weniger akzeptiert werden, ist z. B., wenn die Brücke mit Seilen abgespannt ist und die Abspannseile optisch sichtbar zu schwingen beginnen. Wann ist das der Fall? Wie kann das Zusammenwirken von Seil- und Deckschwingungen genau, aber mit vertretbarem Aufwand erfasst werden? Im „Normalfall“ ist dieses Schwingen einer Fußgängerbrücke ein Gebrauchstauglichkeitsproblem. Ist das immer der Fall? Ab wann können Schwingungen zu einem Tragfähigkeitsproblem werden?

Überlegungen zu diesen **Fragestellungen** werden in diesem Beitrag vorgestellt. Außerdem wird über **Erfahrungen** berichtet, die die Autorin im Laufe ihrer Messungen gesammelt hat. Zu Beginn wird auf die in Deutschland angewandten **Normen** bezüglich Schwingungen bei Fußgängerbrücken eingegangen.

2. Normung

In der Vornorm des **Eurocode 3, Teil 2**, EVN 1993-2:1997, Kap. 4 „Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit“, Abs. 4.9 „Anforderungen an Fußgängerbrücken“ heißt es: „Bei Fußgänger- oder Fahrradwegbrücken sollten Schwingungen, die den Komfort der Nutzer einschränken, entweder durch einen geeigneten Entwurf oder durch entsprechende Dämpfungsmaßnahmen ausgeschlossen werden.“

Die Vornorm des **Eurocode 5, Teil 2**, ENV 1995-2:1997 enthält einen Nachweis für die Schwingungen von Brücken, angeregt durch darüber gehende Personen. Dieser Nachweis wurde weiter entwickelt und ergänzt und in den Entwurf prEN 1995-2:2003, Stage 49 eingearbeitet.



Sind die Eigenfrequenzen zu den vertikalen Eigenformen größer als 5 Hz, so kann ein weiterer Nachweis entfallen. Bei Eigenfrequenzen kleiner als 5 Hz sind Grenzwerte für die Brückenbeschleunigung einzuhalten. Für Einfeldträger ist ein vereinfachtes Nachweisverfahren angegeben. Dabei wird unterschieden zwischen den Einwirkungen Gehen und Laufen.

Dieser Schwingungsnachweis wurde in E DIN 1074:2005-02 aufgenommen. Der Ablauf ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

Bild 1: Nachweis der durch Fußgänger verursachten Schwingungen nach E DIN 1074:2005-02

Die derzeit in Deutschland gültigen Normen für **Lastannahmen** bei Fußgängerbrücken sind Eurocode 1, Teil 2, EVN 1991-2:2003 (D) und DIN 1072:1988-12. Letztere heißt „Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen“. In Abschnitt 3.3.7 (1) gibt sie als „Verkehrsregellasten bei Geh- und Radwegbrücken“ eine Flächenlast $p = 5\text{kN/m}^2$ vor.

„Soweit Tragglieder mehr als 10m weit gespannt sind, darf für diese und ihre Stützungen die Flächenlast in kN/m^2 auf $p = 5,5 - 0,05\ell$ mit ℓ in m, jedoch nicht unter 4kN/m^2 , ermäßigt werden.“

Auf die **Schwingungen** wird im darauf folgenden Abschnitt eingegangen:

„(2) Über die statische Berechnung für die Lasten nach Absatz 1 hinaus können insbesondere bei schlanken, schwach gedämpften Bauwerken Schwingungsuntersuchungen erforderlich sein.“
Zwei wichtige Faktoren werden genannt: Schlank und schwach gedämpft.

Zu den Anforderungen an die **Gebrauchstauglichkeit** werden in DIN 1074:1991-05 „Holzbrücken“, Tabelle 1 Angaben gemacht:

Für Hauptträger, Querträger und Längsträger aus Kantholz und Brettschichtholz ist die zulässige Durchbiegung unter Verkehrslast $\ell/400$. Diese Durchbiegungsbegrenzung ist in den Entwurf der DIN 1974 von 2005 übernommen worden.

In **E DIN 1074:2005-02**, Abs. 9.3.1 „Von Fußgängern verursachte Schwingungen“ heißt es weiter:

„(3) Für Geh- und Radwegbrücken mit Spannweiten $\ell \leq 12\text{m}$ darf ein Schwingungsnachweis entfallen.“

Da die Durchbiegungsbegrenzung aber nach wie vor gilt, ist indirekt eine Art Mindestfrequenz gegeben.

Durchbiegung unter der Verkehrslast p : $w_{Q,inst} \leq \frac{\ell}{400}$

Im Fall eines Einfeldträgers bedeutet dies: $w = \frac{5}{384} \cdot \frac{p \cdot \ell^4}{EI} \leq \ell/400$ und $\frac{EI}{\ell^4} \geq \frac{5 \cdot 400}{384} \cdot \frac{p}{\ell}$

Übertragen auf die Eigenfrequenz des Einfeldträgers: $f_e = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m \cdot \ell^4}}$ und unter folgenden Annahmen

lässt sich für den Einfeldträger zeigen (siehe Bild 2):

Bei Einhaltung der Durchbiegungsbegrenzung wird – je nach Verhältnis von Eigenlast zu Verkehrslast – eine Eigenfrequenz des Einfeldträgers mit Spannweite 12m von 3,2 Hz bis 4,6 Hz sichergestellt.

Brücken mit kurzen Spannweiten ($\ell \leq 12\text{m}$)	Brücken mit längeren Spannweiten ($\ell > 12\text{m}$)
Annahme: $g = m \cdot 9,81 \approx \frac{1}{2} \cdot p$	$g = m \cdot 9,81 \approx p$
$f_e \geq \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{2000 \cdot 9,81 \cdot p}{384 \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot \ell}} = 16 \cdot \sqrt{\frac{1}{\ell}}$	$f_e \geq \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{2000 \cdot 9,81 \cdot p}{384 \cdot p \cdot \ell}} = 11 \cdot \sqrt{\frac{1}{\ell}}$

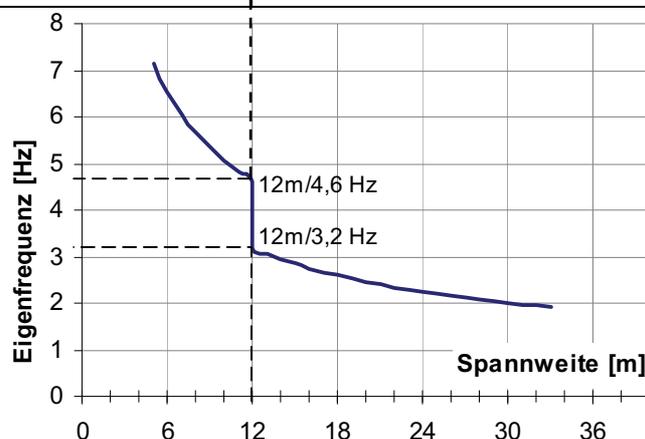


Bild 2: Zusammenhang zwischen Durchbiegungsbegrenzung unter Verkehrslast, $w_{Q,inst} \leq \ell/400$, und der Eigenfrequenz beim Einfeldträger mit $g = \frac{1}{2} p$ bzw. $g = p$

3. Erfahrungen aufgrund von Messungen an Fußgängerbrücken

3.1 Messungen von Dämpfungswerten von Fußgängerbrücken aus Holz

3.1.1 Ausklingkurve



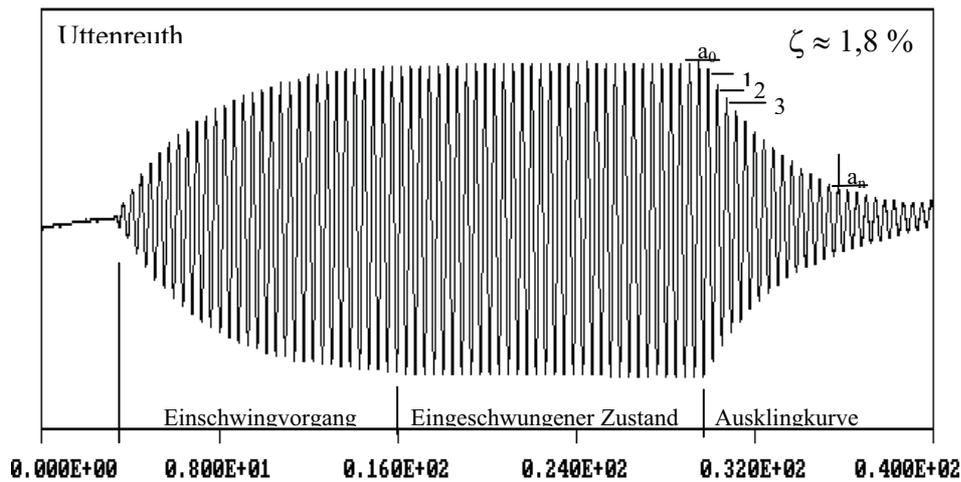
Uttenreuth



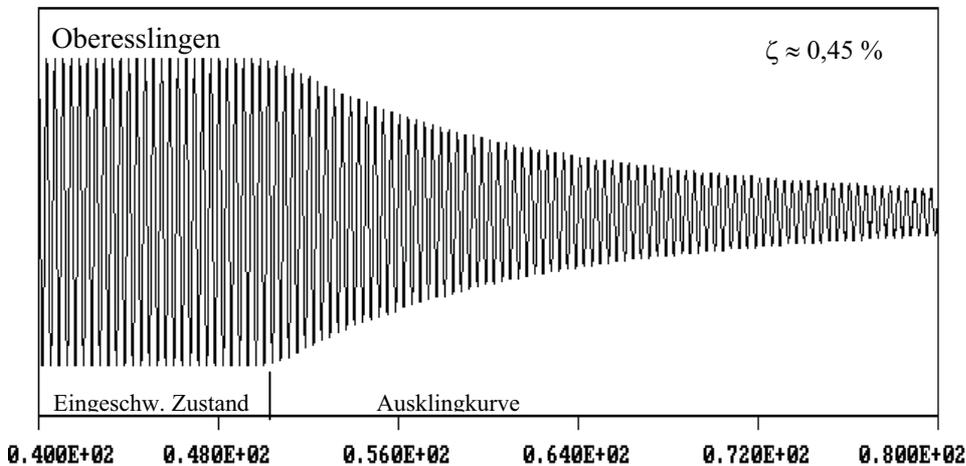
Oberesslingen

Bild 3: Fotos der Fußgängerbrücken in Uttenreuth und Oberesslingen

Zeitreihe Beschl. Datei:u2-240i Kanal: 0 Zeitabstand [sec]:0.5000E-02
 -1.2000E+00 ... 0.2000E+00 lin. Mi 22. 5.2002 12:27:57



Zeitreihe Beschl. Datei:es4-274i Kanal: 0 Zeitabstand [sec]:0.5000E-02
 -1.000E+01 ... 0.1000E+01 lin. Mo 16.12.2002 10: 5:20



Mit einem selbst entwickelten mechanischen Schwingungserreger wird eine sinusförmige Kraft auf die Brücke aufgebracht. Nach Erreichen des eingeschwungenen Zustands wird der Erreger gestoppt und die Ausklingkurve gemessen (siehe Bild 4).

Das logarithmische Dekrement Λ und das Lehr'sche Dämpfungsmaß ζ können wie folgt bestimmt werden:

$$\Lambda = \frac{1}{n} \cdot \ln \frac{a_0}{a_n}; \quad \zeta = \frac{\Lambda}{2\pi}$$

Bild 4 zeigt zwei extreme Dämpfungsverhalten. Die blockverleimte Brücke mit Gussasphaltbelag in Uttenreuth mit einem hohen Dämpfungswert und die abgespannte Brücke in Oberesslingen mit einem geringen Dämpfungswert.

Bild 4: Messschriebe für die Messungen in Uttenreuth and Oberesslingen

3.1.2 Resonanzkurve

Zusätzlich wurde das Dämpfungsmaß durch eine weitere Methode gemessen, und zwar mit Hilfe der Resonanzkurve, vgl. [Petersen, 1996]. Dabei werden mit einem mechanischen Schwingungserreger sinusförmige Kräfte mit unterschiedlichen Erregerfrequenzen auf die Brücke aufgebracht. Die Amplituden der Brücke im eingeschwungenen Zustand werden gemessen und mit der zugehörigen Erregerfrequenz in einem Diagramm aufgetragen. Die maximale Amplitude a_{\max} tritt bei Resonanz zwischen Eigen- und Erregerfrequenz auf. Bei den Amplituden $a_{\max}/\sqrt{2}$ sind die zugehörigen Erregerfrequenzen f_1 and f_2 zu ermitteln. Die Differenz derer geteilt durch deren Summe ergibt das Lehr'sche Dämpfungsmaß ζ (siehe Bild 5).

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2} \approx \frac{f_2 - f_1}{2 \cdot f_e}$$

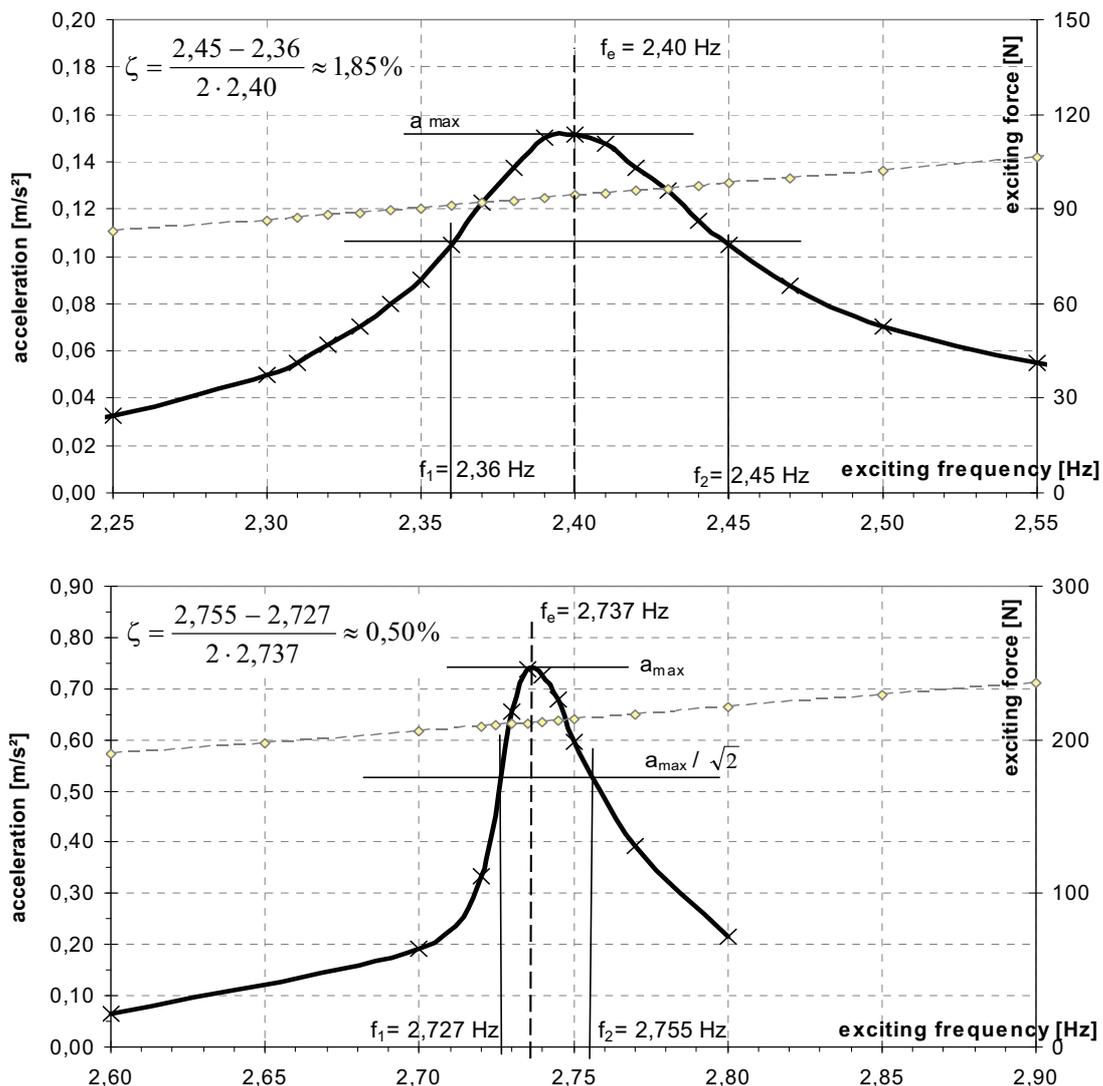
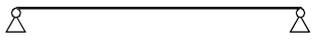
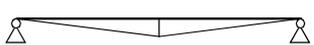
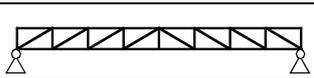
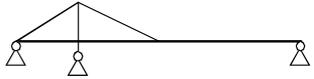
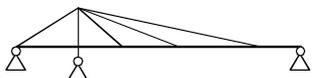


Bild 5: Resonanzkurven (gemessene Beschleunigung und Erregerkraft) für die Fußgängerbrücken in Uttenreuth (oben) und Oberesslingen (unten)

Als Ergebnis der Dämpfungsmessungen an ca. 20 Fußgängerbrücken aus Holz kann folgende Tabelle angegeben werden (Tab. 1).

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen statischem System der Fußgängerbrücken aus Holz und dem Lehr'schen Dämpfungsmaß; entnommen aus [Dissertation Hamm, 2003]. Die Werte sind Ergebnisse aus Messungen und als Orientierungshilfe zu verstehen. Je nach örtlichen Gegebenheiten (z. B. Baugrund, Lager) sind abweichende Werte möglich.

Statisches System der Brücke aus Holz		Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ
Biegeträger- Brücke aus Brettschichtholz		1,20 %
Unterspannte Brücke		0,90 %
Fachwerkbrücke		0,80 %
Abgespannte Brücke mit kurzen Seilen		1,00 %
Abgespannte Brücke mit langen Seilen		0,30 %
Gussasphaltbelag		zusätzlich 0,30 %

3.2 Erfahrungen bei der Messung von Eigenfrequenzen und Beschleunigungswerten

3.2.1 Beispiel: Kastenbrücke mit Gussasphaltbelag in Uttenreuth, Einfeldträger

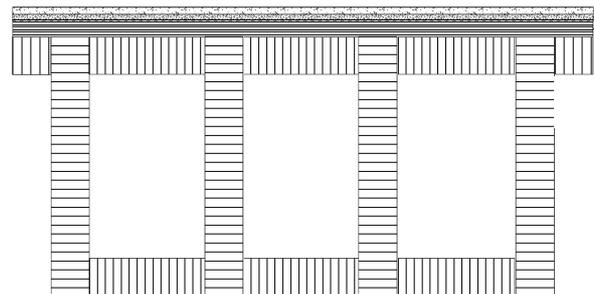


Bild 6: Foto und Querschnitt der Fußgängerbrücke in Uttenreuth; Schaffitzel Holzindustrie GmbH & Co., Schwäbisch Hall

Systemdaten: Spannweite: $\ell = 30,7 \text{ m}$
Masse: $m = 1210 \text{ kg/m}$
Eigenfrequenz: $f_e = 2,4 \text{ Hz}$ (gemessen)

Die Spannweite ist größer als 12m und die Eigenfrequenz ist mit 2,4 Hz kleiner als 5 Hz. Somit ist nach E DIN 1074:2005-02 ein Schwingungsnachweis erforderlich.

Da die Eigenfrequenz kleiner als 2,5 Hz ist, müsste der Nachweis nur für einen Geher, die gehende Gruppe und evtl. (je nach Lage der Brücke) für den Fußgängerstrom geführt werden. Ein Läufer muss nicht berücksichtigt werden.

Die folgenden Formeln für die Beschleunigung sind E DIN 1074:2005-02 entnommen worden.

Die Beschleunigung infolge eines gehenden Fußgängers und der gehenden Gruppe (= 13 Personen) kann nach folgenden Formeln berechnet werden. Für das Lehr'sche Dämpfungsmaß wird der Wert für Biegeträgerbrücken plus Gussasphaltbelag ($\zeta=1,2\%+0,3\%=1,5\%$) nach Tabelle 1 eingesetzt.

$$a_{\text{vert},1,\text{Gehen}} = \frac{200}{M \cdot \zeta} = \frac{200}{m \cdot \ell \cdot \zeta} = 0,36 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} < 0,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_{\text{vert},\text{Gruppe,Gehen}} = 0,23 \cdot n \cdot a_{\text{vert},1} \cdot k_{\text{vert}} = 0,23 \cdot 13 \cdot 0,36 \cdot 1 = 1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} > 0,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Der Beiwert k_{vert} ist abhängig von der Eigenfrequenz der Brücke. Für $1,5 \text{ Hz} < f_e < 2,5 \text{ Hz}$ ist k_{vert} gleich 1.

Der Wert der Brückenbeschleunigung für einen die Brücke überquerenden Läufer wird wie folgt berechnet:

$$a_{\text{vert},1,\text{Laufen}} = \frac{600}{M \cdot \zeta} = 1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} > 0,7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Dieser Wert ist in etwa so hoch wie der gemessene Wert ($a_{\text{vert},1,\text{Laufen}} = 1,3 \text{ m/s}^2$, siehe Bild 7).

Zeitreihe Beschl. Datei:u4-li Kanal: 0 Zeitabstand [sec]:0.5000E-02
-0.2500E+01 ... 0.2500E+01 lin. Mi 22. 5.2002 13:23:45

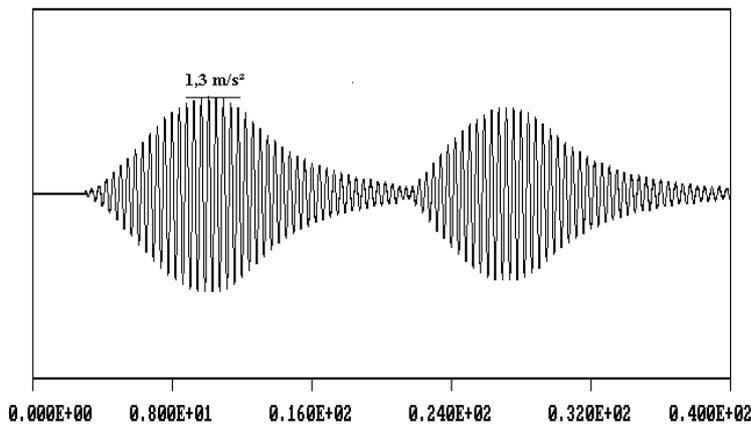


Bild 7: Messschrieb für das zweimalige Überqueren der Brücke Uttenreuth durch einen Läufer in Resonanz

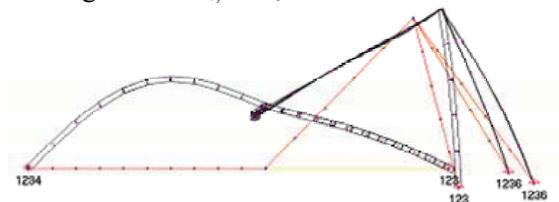
3.2.2 Beispiel: Abgespannte Brücke aus Brettschichtholz in Zwiesel

Es handelt sich um eine mit Schrägseilen abgespannte Brücke mit einem blockverleimten Brückendeck.

Systemdaten: Gesamte Länge: $\ell = 39,82 \text{ m}$
 Gehbahnbreite: $b = 2,8 \text{ m}$
 Querschnitt: $b \times h = 2,8 \times 0,5 \text{ m}^2$
 Material: Brettschichtholz Gl 28h
 Biegesteifigkeit: $EI = 367,5 \text{ MN/m}^2$
 Masse: $m = 992 \text{ kg/m}$ bzw. 354 kg/m^2
 Dämpfung nach Tab.1: $\zeta = 0,01$



1. Eigenform: $f_{e,1} = 1,81 \text{ Hz}$



2. Eigenform: $f_{e,2} = 2,58 \text{ Hz}$

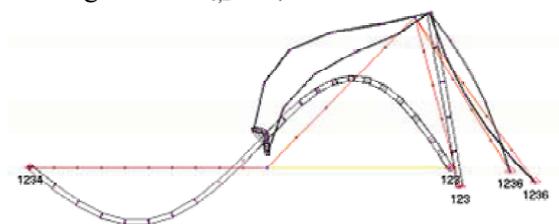
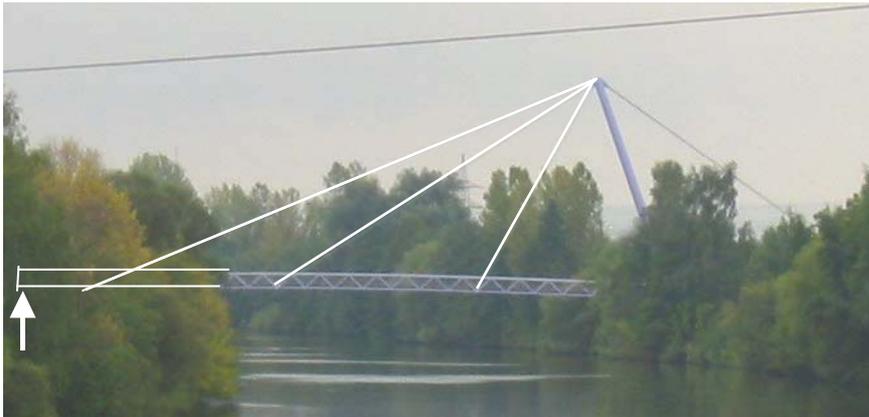
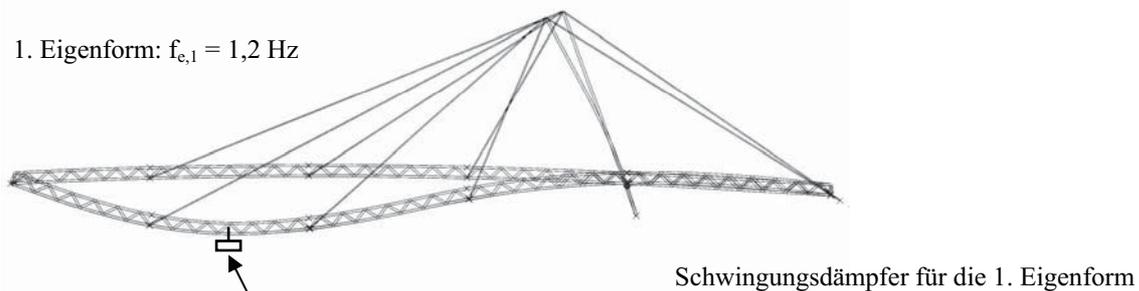


Bild 8: Foto und Modell für die 1. und 2. Eigenform der Fußgängerbrücke in Zwiesel

3.2.3 Beispiel: Abgespannte Brücke aus Stahl in Forchheim



1. Eigenform: $f_{e,1} = 1,2$ Hz



2. Eigenform: $f_{e,2} = 2,86$ Hz

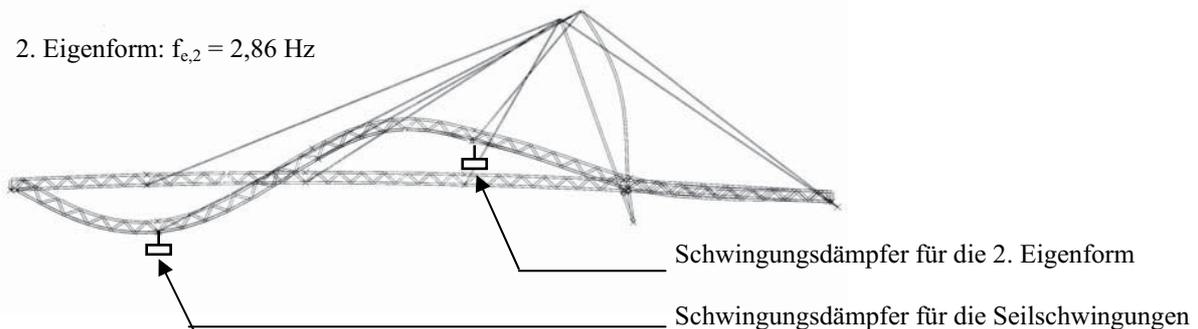


Bild 9: Foto und Modell für die 1. und 2. Eigenform der Fußgängerbrücke in Forchheim inkl. der eingebauten Schwingungsdämpfer

3.2.4 Vergleiche

Am Fachgebiet Holzbau, TU München wurden Schwingungsmessungen an mehr als 20 Fußgängerbrücken durchgeführt. Die Messergebnisse wurden mit den Rechenergebnissen nach E DIN 1074:2005-02 verglichen. Eine Gegenüberstellung findet sich in Bild 10. Die Ergebnisse passen – je nach System und Eigenfrequenz – gut zusammen.

3.3 Weitere Erfahrungen

Einwirkungen: Läufer (Jogger) kommen immer häufiger vor. Die dynamische Einwirkung der 1. Harmonischen auf die Brücke beim Laufen ist etwa das Dreifache der Einwirkung beim Gehen, vgl. [Bachmann, 1997]. Die Schrittfrequenz ist höher als beim Gehen, weswegen auch bei steiferen Brücken Resonanz auftreten kann. Die Unterscheidung Geher – Läufer ist in E DIN 1074:2005-2 aufgenommen worden.

Höhere Eigenfrequenzen: Nicht nur die Eigenfrequenz zur ersten vertikalen Eigenform kann zu Resonanzschwingungen angeregt werden, sondern alle Eigenfrequenzen, die im Bereich der Schrittfrequenz liegen. Deswegen genügt es nicht, nur die erste Eigenfrequenz zu berechnen und zu untersuchen, sondern alle Eigenfrequenzen kleiner als 5 Hz.

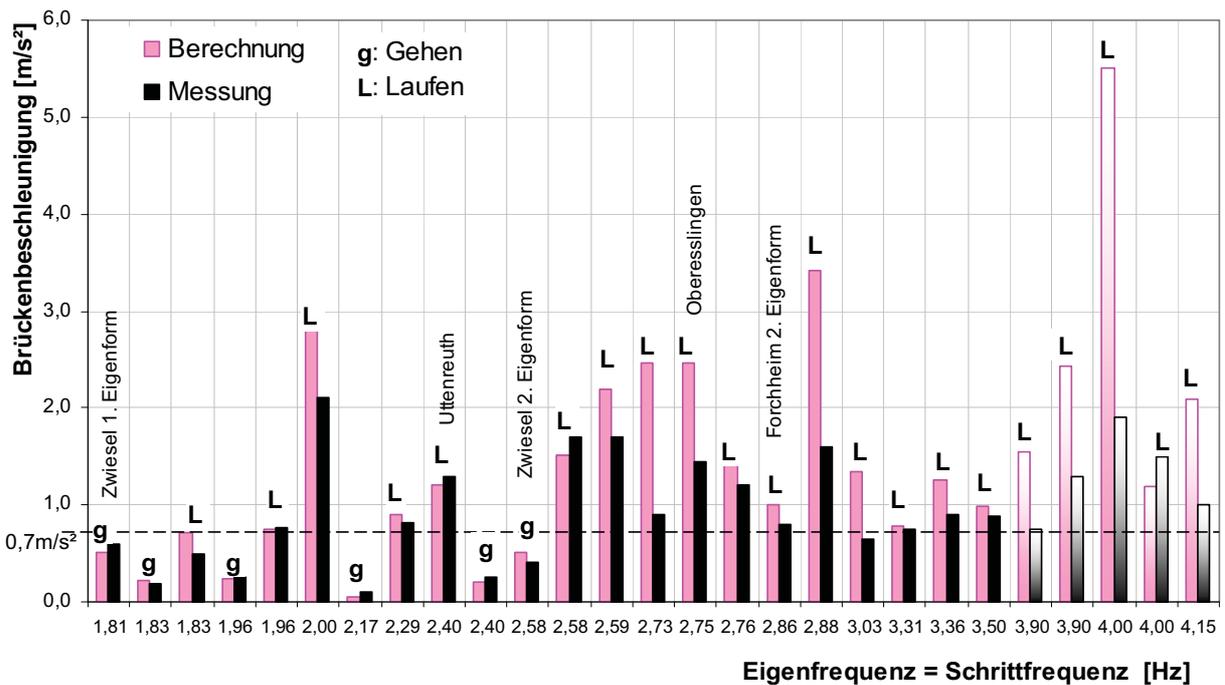


Bild 10: : Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Beschleunigungen infolge eines gehenden oder laufenden Fußgängers in Resonanz. Schrittfrequenzen über 4 Hz sind nur mit sehr sportlichen Versuchspersonen zu erreichen, deswegen sind diese Werte hell dargestellt.

4. Überlegungen / Fragestellungen / Ausblick

4.1 Überlegungen zu den Grenzwerten

Die 0,7m/s²- Grenze (in Bild 10 gestrichelt dargestellt) wird v. a. durch Läufer überschritten. Liegen die Werte der Brückenbeschleunigung deutlich über dem Grenzwert, wird der Einbau eines Schwingungsdämpfers empfohlen. Bei Beschleunigungen im Bereich der Grenzwerte liegt die Entscheidung für den Einbau des Dämpfers im Ermessensspielraum des Bauherrn. Überlegungen, in welchen Fällen die Einhaltung der empfohlenen Grenzwerte von der Autorin stark befürwortet wird und in welchen nicht, sind in Tabelle 2 gegeben. Zur Auslegung eines Dämpfers siehe [Petersen, 2001].

Tabelle 2 : Überlegungen zur Einhaltung der empfohlenen Grenzwerte der Beschleunigung

Benutzungshäufigkeit	oft	selten
Art/ Anzahl der Nutzer	häufig Gruppen	meist nur Einzelpersonen
Lage/Art der Brücke	- zentral in Stadtmitte - Aussichtspunkt - überdacht - lädt zum Verweilen ein	abseits
Statisches System	Schrägseilbrücke (Das Schwingen der Seile ist optisch störend und evtl. ein Ermüdungsproblem.)	einfaches statisches System, z.B. Einfeldträger.
Folgerung:	Die Einhaltung des Grenzwertes der Beschleunigung infolge von Fußgängern und Läufern ... wird dringend empfohlen.	... muss nicht so streng gesehen werden.

4.2 Überlegungen zur Ermüdung / Tragfähigkeit

Zur Klärung, ob die Schwingungen von Fußgängerbrücken ein reines Gebrauchstauglichkeitsproblem oder auch ein **Tragfähigkeitsproblem** sein können, wird **DIN 1074:1991-5**, Abs. 4.2 „Nachweis der **Dauerschwingbeanspruchung**“ herangezogen.

„(1) Für Bauteile aus **Holz** und Bau-Furniersperrholz ist ein Nachweis der Dauerschwingbeanspruchung nicht erforderlich. DIN 1052 Teil 1, Abschnitt 6,5, ist gegebenenfalls zu beachten.“

Der zitierte Abschnitt behandelt wechselbeanspruchte Bauteile, d.h. Bauteile, deren Spannungen einen Vorzeichenwechsel erfahren.

Bei einem Einfeldträger würde ein Vorzeichenwechsel der Biegespannungen dann eintreten, wenn die Brücke auf Grund der Schwingungen abheben wollte, d.h. die Beschleunigung der Brücke nach oben größer als die Erdbeschleunigung ist. (Unwahrscheinlich)

Beispiel: Brücke in Zwiesel

Beim Überqueren der Brücke durch eine Gruppe von 7 Läufern wurde eine Beschleunigung von $a = 5,4 \text{ m/s}^2$ gemessen.

Das heißt, die Einwirkung auf die Brücke auf Grund der Eigenlast ist nun

$$m \cdot (g + a) = m \cdot (9,81 + 5,4) \approx 1,5 \cdot g.$$

Diese hohen Beschleunigungswerte können – nach Ansicht der Autorin – nur bei ungehindertem Überqueren auftreten, in der Regel wenn die Brücke frei von sonstiger Verkehrslast ist.

Unter folgenden Annahmen

- während des Überlaufens vernachlässigbare Verkehrslast
- 100% Ausnutzung unter $g+p$
- Verhältnis von Eigenlast zu Verkehrslast: $g : p = 3,54 : 4,0$

kann der Ausnutzungsgrad für den Lastfall „Überqueren durch 7 Läufer“ wie folgt berechnet werden:

$$\frac{1,5 \cdot g}{g + p} = 0,70$$

Die Einwirkung wird überwiegend durch die Abspannseile aufgenommen, weshalb die zusätzliche **Durchbiegung des Decks beim Schwingen** eher gering ist:

$$w = \frac{a}{(2\pi \cdot f)^2} = \frac{5,4}{(2\pi \cdot 2,58)^2} \approx 2,0 \text{ cm}$$

Das entspricht einem Radius von $R \approx 10\,000 \text{ m}$ und einer zusätzlichen Krümmung und Biegespannung im Deck von:

$$\kappa = \frac{1}{R} = \frac{M}{EI} = 0,0001 \frac{1}{\text{m}}; \quad \sigma = \frac{M}{EI} \cdot E \cdot z = 0,0001 \cdot 12\,600 \cdot 0,25 = 0,32 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2}$$

Diese sind vernachlässigbar gering.

Die **Seile** dagegen erfahren durch diese Schwingungen eine Schwellbeanspruchung – im ungünstigsten Fall – zwischen 0 kN und dem 1,5 fachen der Zugkraft bei Eigenlast.

Ist für die Seile und die Anschlüsse ein Ermüdungsnachweis erforderlich?

„(2) Für **Stahlbauteile** und **Verbindungsmittel** von Straßenbrücken, die durch Verkehrsregellasten nach DIN 1072/12.85, Tabelle 1 (Verkehrsregellasten der Regelklassen 60/30, 30/30), beansprucht werden, ist ein Nachweis der Dauerschwingbeanspruchung zu erbringen. Beim Nachweis mechanischer Verbindungen nach DIN 1052 Teil 2 ist Abschnitt 5.2 zu beachten.“

In **DIN 1074:1991-5**, Abschnitt 5.2 ist der „Nachweis der Dauerschwingbeanspruchung“ für **mechanische Verbindungen** über einen Abminderungsfaktor $k_{s,w}$ geregelt.

$$k_{s,w} = 0,75 \pm 0,25 \cdot \frac{\min. |N|}{\max. |N|}$$

„Bei Schwellbeanspruchung gilt das positive, bei Wechselbeanspruchung das negative Vorzeichen.“

Für die Beispielbrücke in Zwiesel errechnet sich ein Abminderungsfaktor von $k_S = 0,75$.
Bei dem oben berechneten Ausnutzungsfaktor von 0,70 ist der Nachweis erfüllt.

Der **Nachweis der Stahlbauteile** (hier: der Seile) erfolgt nach DIN 18800:1990-11 bzw. nach **Eurocode 3, Teil 2**, EVN 1993-2:1997.

Hier heißt es, in Kap. 9 „Werkstoffermüdung“, Abs. 9.1 „Allgemeines“:

„(2) Ein Ermüdungsnachweis ist in der Regel nicht erforderlich für:

- Fußgängerbrücken, Kanalbrücken oder andere Brücken, die überwiegend statisch beansprucht werden, jedoch mit Ausnahme solcher Brücken oder Bauteile, die leicht durch Fußgänger oder Wind angeregt werden.“

Abs. 9.2.1 (3):

„Angaben für den Ermüdungsnachweis von schlanken Bauteilen, die durch Wind angeregt werden, sind in Anhang F enthalten.“

E DIN 1074:2005-02, Kap. 10 „Allgemeine Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit“

„(4) Für Geh- und Radwegbrücken ist üblicherweise kein Ermüdungsnachweis erforderlich.“

Im Anhang C der genannten Norm ist ein „Ermüdungsnachweis für Holz, Holzwerkstoffe und Holzverbindungen“ angeführt.

4.3 Überlegungen zum Zusammenwirken Seil und Deck

Einfeldträger sind einfache Systeme. Die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messergebnissen ist hier fast immer gegeben. D.h. ihr dynamisches Verhalten lässt sich zutreffend „vorhersagen“.

Dies gilt ebenso für **Durchlaufträger**, Sprengwerke und Fachwerke.

Das Lehr'sche Dämpfungsmaß für Holzbrücken mit diesen Systemen liegt zwischen 0,8% und 1,2% (bzw. 1,5%, siehe Tabelle 1).

Bei **abgespannten Brücken** ist es komplizierter, das dynamische Verhalten zu berechnen. Besonders interessieren die Eigenformen mit zugehörigen Eigenfrequenzen und die Beschleunigungen infolge von Fußgängern und Läufern.

Mit FE Programmen lassen sich die Eigenformen und Eigenfrequenzen des Brückendecks fast immer ausreichend genau berechnen. Der nicht-lineare Effekt des Zusammenwirkens der Seile und des Decks wird in den meisten Fällen aber nicht erfasst. Gerade bei langen Seilen mit niedrigen Eigenfrequenzen $f_{e, \text{Seil}}$ kann jedoch der Effekt der sog. Parameterresonanz eintreten (vgl. Bild 11). Das bedeutet: Das Seil schwingt mit einer Frequenz $f_{e, \text{Seil}}$ um seine Ruhelage. Bei jeder Bewegung (egal ob auf oder ab) bewegt sich der Fußpunkt A nach oben. D.h. der Fußpunkt bewegt sich mit $2 f_{e, \text{Seil}}$ und regt mit dieser Frequenz das Brückendeck zu Schwingungen an.

Umgekehrt können Bewegungen des Decks mit $2 f_{e, \text{Seil}}$ das Seil zu Schwingungen mit $f_{e, \text{Seil}}$ anregen. Wenn nun eine Eigenfrequenz des Decks (gleichgültig ob die 1. oder 2. vertikale Eigenform) $2 f_{e, \text{Seil}}$ ist, kann die sog. Parameterresonanz auftreten.

Durch einen einfachen Versuch konnte an der Brücke in Forchheim dieser Fall gezeigt werden:

Nachdem mit einem Hilfsseil das Abspannseil mit $f_{e, \text{Seil}} = 1,4$ Hz angeregt worden war, schaukelte sich das Deck mit $2 f_{e, \text{Seil}} = 2,8$ Hz auf.

In dem zitierten Symposium [Cable Dynamics] wird dieses Thema aufgegriffen und Hilfestellung gegeben, wie diese Effekte behandelt werden können.

4.4 Ausblick

Nach Einschätzung der Autorin sollten zu den beiden Fragestellungen

- Übergang Gebrauchstauglichkeit – Tragfähigkeit (Ermüdung) und

- Zusammenwirken Seil – Deck bei abgespannten Brücken

noch ausführlichere Untersuchungen und Beispiele veröffentlicht werden.

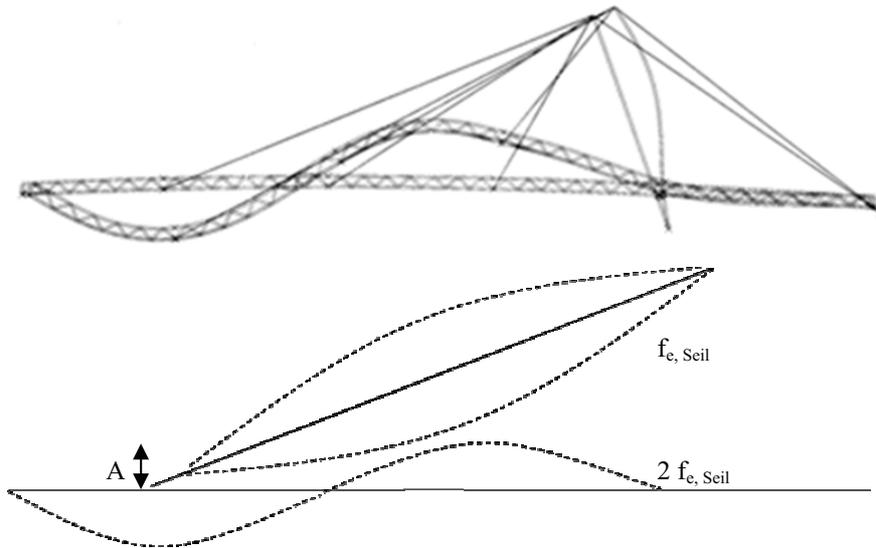


Bild 11: Parameterresonanz Seil – Brückendeck am Beispiel der 2. Eigenform der Brücke in Forchheim

5. Literatur

DIN 1052: 1988-04: „Holzbauwerke; Berechnung und Ausführung“. April 1988.

DIN 1052:2004-08: „Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau“. August 2004.

DIN 1072:1988-12: „Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen“. Dezember 1988.

DIN 1074:1991-05: „Holzbrücken“. Mai 1991.

E DIN 1074:2005-02: „Holzbrücken“ Entwurf. Februar 2005.

DIN 18800:1990-11: „Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion“. November 1990.

EN 1991-2:2003 (D): „Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken“. Deutsche Fassung Mai 2004.

ENV 1993-2:1997: „Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken“ Vornorm. Deutsche Fassung Februar 2001.

ENV 1995-2:1997: „Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 2: Brücken“ Vornorm. Deutsche Fassung August 1999.

prEN 1995-2:2003 (E): „Design of timber structures – Part 2: Bridges“. Draft. Stage 49. November 2003.

Bachmann, Hugo et al.: „Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines“. 2nd Edition, Birkhäuser Verlag Basel, Berlin, Boston, 1997.

Hamm, Patricia: „Ein Beitrag zum Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Fußgängerbrücken aus Holz“. Dissertation. TU München, November 2003.

Download unter: <http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/karin.php#bv>

Kreuzinger, Heinrich; Hamm, Patricia: „Schwingungen von Fußgängerbrücken“. In: „bauen mit holz“ 11/2004. S. 22-25. November 2004.

Petersen, Christian: „Dynamik der Baukonstruktionen“. Vieweg Verlag Braunschweig / Wiesbaden. 1. Auflage 1996. korrigierter Nachdruck 2000.

Petersen, Christian: „Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau“. Maurer Söhne GmbH & Co. KG. München. 2001.

Fifth International Symposium on Cable Dynamics. Santa Margherita Ligure (Italy), September 15-18, 2003.