

Schwingungen und Dämpfung im Stahlbau

Summary

Brücken, aber auch Bauwerke des Hoch- und Industriebaus können durch dynamische Einwirkungen zu Schwingungen angeregt werden. Turmartige Tragwerke reagieren auf Windeinwirkungen, rotierende oder stoßende Massen in Maschinen übertragen dynamische Einwirkungen auf Bauwerke, aus Gehen, Laufen und Hüpfen von Menschen erfahren Geschossdecken und Fußgängerbrücken periodische Lasten und aus dem Straßen- und Bahnverkehr werden Erschütterungen auf Bauwerke übertragen. Zur Bewertung des Verhaltens der Tragwerke unter diesen periodischen Einwirkungen sind die Baustrukturen zusätzlich zu den üblichen statischen Untersuchungen nach den Gesetzen der Dynamik zu analysieren. Eine besondere Bedeutung erlangt hierbei die Wertung der Ergebnisse einschließlich der Festlegung von Akzeptanzgrenzen. Da Menschen unterschiedlich stark auf Schwingungen reagieren, können Vorgaben in Regelwerken oft nur als Anhaltswerte interpretiert werden. Liegen die Schwingungsamplituden außerhalb tolerierbarer Grenzen, stellen auf das dynamischen Verhalten des Bauwerks abgestimmte Dämpfersysteme eine wirkungsvolle Methode zur Verminderung der Tragwerksschwingen dar.

Einleitung

Bauwerke, die dynamischen Einwirkungen ausgesetzt sind, reagieren auf die eingebrachte Energie mit Schwingungen. Gerade bei Tragstrukturen, die unter der Prämisse eines ökonomischen Materialeinsatzes ausgeführt sind oder besonderen Gestaltungsansprüchen genügen müssen, wird häufig über wahrnehmbare Schwingungen berichtet. Die Nutzung der Möglichkeiten moderner Werkstoffe führt zwangsläufig zu schlanken Konstruktionen mit verminderten Steifigkeiten bei gleichzeitig reduziertem Gewicht. Die geringen Steifigkeiten haben eine Verschiebung der Eigenfrequenzen hin zu einer möglichen Resonanzanregung zur Folge. Da mit der geringeren Steifigkeit auch eine Verminderung der in Bewegung zu versetzenden Masse des Bauwerks einhergeht, wird das Tragwerk durch die eingetragene Energie zu deutlich wahrnehmbaren Schwingungen angeregt. Treten gar Resonanzschwingungen auf, so können die ausgeprägten Schwingungsamplituden eine Bauwerkschädigung bewirken. Exponierte Beispiele für schwingungsempfindliche Bauwerke stellen Hochhäuser, Türme und Masten, Kamine, Antennen und Brückenbauwerke dar. Im Regelfall handelt es sich bei den turmartigen Bauwerken um windinduzierte Schwingungen. Bei Brückenbauwerken kommen zu den durch Wind verursachten dynamischen Reaktionen noch verkehrsinduzierte Schwingungen hinzu. In diesem Kontext spielen Fußgängerbrücken eine besondere Rolle. Die dynamischen Einwirkungen werden durch Gehen und Laufen in die Bauwerke eingetragen. Im Vergleich hierzu sind die von Radfahrern ausgehenden Lasten gering. Mit besonderer Sorgfalt sind die Auswirkungen von rhythmisch wippenden oder hüpfenden Personen zu verfolgen. Die Schwingungen betreffen bei Fußgängerbrücken nicht nur die Versteifungsträger. Pylone und Kabel in Schrägseil- und Hängebrücken können ebenfalls zu Schwingungen angeregt werden. Den Fußgängerbrücken vergleichbare Fragestellungen sind auch bei weitgespannten Deckensystemen in Bürogebäuden, Turn- und Sporthallen oder bei langen Treppenläufen zu beantworten.

Grundlagen

Die vertikalen und horizontalen dynamischen Einwirkungen auf Fußgängerbrücken und Geschoßdecken entstehen durch rhythmische Körperbewegungen von Personen. Dabei übertragen gehende und laufende Personen beim Aufsetzen der Ferse und beim Abstoßen mit dem Fußballen eine Kraft auf den Gehweg der Tragkonstruktion. Neben den vertikalen Kräften leiten Personen auch horizontale Kräfte in die Unterlage ein. Diese Kräfte entstehen durch das Pendeln des Massenschwerpunktes des Körpers senkrecht zur Bewegungsrichtung. Dabei ist zu beachten, dass die Frequenz der Pendelbewegung des Körpers der halben Schrittfrequenz entspricht. Das Spektrum der Schrittgeschwindigkeiten liegt zwischen 1,5 Hz bei langsamem Gehen bis zu 2,5 Hz bei zügigem Gehen. Beim Laufen können Schrittfrequenzen von bis zu 3,2 Hz erreicht werden. Zur Berücksichtigung der horizontalen Pendelbewegungen ist somit von einer Einwirkungsfrequenz von 0,75 bis 1,6 Hz auszugehen. Obwohl die von Personen auf Fußgängerbrücken ausgeübten horizontalen Einwirkungen verhältnismäßig klein sind, bewirken sie doch aufgrund der geringen Horizontalsteifigkeit und der damit verbundenen niedrigen Eigenfrequenz von Fußgängerbrücken starke Schwingungen. Aufsehen erregende Fälle der letzten Jahre haben die Problematik der Horizontalschwingungen deutlich gezeigt.

Bei den dynamischen Belastungen aus einem Fußgängerstrom ist zwischen regelloser und synchroner Einwirkung zu unterscheiden. Im Durchschnitt werden sich die impulsartigen Lasteinträge der Fußgänger innerhalb eines definierbaren Frequenzbereiches zufällig einstellen. Dabei ist davon auszugehen, dass sich die Einwirkungen einzelner Fußgänger einer Gruppe abwechselnd potenzieren oder kompensieren. Eine synchrone Einwirkung kann von im Gleichschritt marschierenden oder rhythmisch wippenden bzw. hüpfenden Personen ausgehen. Ein weiterer Synchronisationseffekt kann durch die Rückkopplung eines Fußgängerstromes mit der schwingenden Brücke entstehen. Es ist zu beobachten, dass Fußgänger beim Gehen und Laufen ab einem bestimmten Schwellenwert ihre Schrittfrequenz an die vertikale und horizontale Bewegung einer Fußgängerbrücke anpassen, sich synchronisieren. Praktisch bedeutet dies, dass die Fußgänger den Takt der Brückenschwingung übernehmen und jeweils im Wellental impulsartig auf das Bauwerk einwirken. Durch diese resonanzähnliche Anregung nehmen die Schwingungsamplituden mit einer fortschreitenden Synchronisation des Fußgängerstromes zu. In Fachpublikationen wird darüber berichtet, dass vereinzelt eine Synchronisation bei mehr als 80% der Personen eines Fußgängerstromes beobachtet wurde.

Stimmt im ungünstigen Fall die Eigenfrequenz der Brücke, meist die vertikale oder horizontale Grundbiegefrequenz, mit der Frequenz der Einwirkung überein, so kommt es zu harmonischen Schwingungen mit einem ausgeprägten, resonanzähnlichen Verhalten. Neben den Grundeigenformen können auch höhere Eigenfrequenzen angeregt werden. Im stationären Schwingungszustand treten erhebliche Schwingungsamplituden auf, die nur durch die Dämpfung oder eine gezielte Frequenzverstimmung der Brücke begrenzt werden können. Eine Frequenzabstimmung ist immer mit erheblichen Eingriffen in das äußere Erscheinungsbild der Brücke verbunden. Die Steifigkeit muss häufig so angepasst werden, dass neben der vertikalen und horizontalen Grundeigenfrequenz auch die 2. und möglicherweise auch höhere Eigenfrequenzen oberhalb des Anregungsspektrums liegen. Wirkungsvoller ist zunächst eine gezielte Erhöhung der Eigendämpfung des Systems und wenn erforderlich, der Einbau von auf das Tragwerk abgestimmten, zusätzlichen Schwingungsdämpfern.

Konzeption der Bedämpfung von Schwingungen durch Masse-Feder-Dämpfer-einheiten

Bei Masse-Feder-Dämpfereinheiten handelt es sich um Systeme zur gezielten Bedämpfung der Schwingungen von Bauwerken, die in der Eigenfrequenz und dem Dämpfungsmaß genau auf das Tragwerk abgestimmt sein müssen. Das System besteht aus einer Zusatzmasse, die am schwingenden Tragwerk federnd befestigt ist. Dieses Tilgersystem übt Gegenkräfte auf das Tragwerk aus und reduziert damit dessen Schwingungsamplituden. Beim Eintrag entsprechender Schwingungsenergie wird das Masse-Feder-System zum Schwingen angeregt, während die Bewegungen der Konstruktion gedämpft werden. Da in diesem Zustand am Masse-Federsystem Resonanzschwingungen auftreten, ist es erforderlich, Schwingungsenergie durch dämpfende Komponenten zu dissipieren. Als dämpfendes Medium kommen elastomere Werkstoffe, Reibungselemente oder Fluide in Betracht, bei denen die Bewegungsenergie durch Reibung oder Verzerrung in Wärmeenergie umgewandelt wird. Gute Dämpfungseigenschaften weisen viskose Dämpfer auf, bei denen neuere Entwicklungen zudem eine elektronische Steuerung und Anpassung der Dämpfung gestatten. Im Allgemeinen sind die Schwingungen einer bestimmten Eigenfrequenz zu reduzieren. Sollte es erforderlich werden, diverse Eigenfrequenzen zu bedämpfen, so werden mehrere Dämpfereinheiten mit unterschiedlichen Eigenfrequenzen erforderlich. Die Funktionsweise eines Schwingungsdämpfers ist schematisch in **Bild 1** dargestellt.

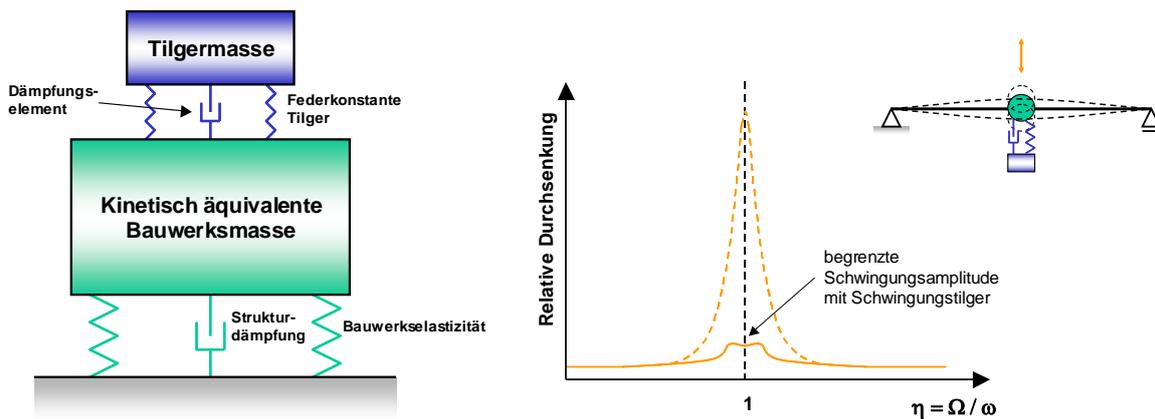


Bild 1 Wirkung eines Schwingungsdämpfers

Im Regelfall wird an der Stelle, an der die maximalen Schwingungsamplituden der betrachteten Eigenform auftreten, das Masse-Feder-Dämpfer-System, das durch die Wahl von Federn mit definierter Federkonstante und einer auf die kinetisch äquivalente Masse des Bauwerks abgestimmten Tilgermasse gekennzeichnet ist, installiert. Das Dämpfungssystem ist umso wirkungsvoller, je größer die Tilgermasse im Vergleich zur kinetisch äquivalenten Masse des zu bedämpfenden Tragwerks ist. Günstige Verhältnisse von Tilgermasse zu kinetisch äquivalenter Masse liegen in einer Größenordnung von 2 bis 5 %. Aufgrund des Aufbaus ist ein Masse-Feder-Dämpfersystem nur in einem engen Frequenzbereich optimal wirksam.

Numerische Bewertung der Schwingungssensitivität

Mit EDV-orientierten Methoden kann eine numerische Beurteilung der Schwingungssensitivität von Bauwerken durchgeführt werden. Neben den modalen Kenngrößen der Eigenfrequenzen mit den zugehörigen Schwingungsformen besteht ebenfalls die Möglichkeit, zeitabhängige Einwirkungen eines Fußgängerstromes zu formulieren und die dynamischen Reaktionen des Tragwerks zu berechnen. Die Vorgehensweise einer numerischen Schwingungsanalyse wird nachfolgend am Beispiel der Neulandbrücke in Leverkusen erörtert, die sich gegenwärtig im Bau befindet. Dabei handelt es sich um eine dreifeldrige Tragkonstruktion mit einem Innenfeld von 45 m und Randfeldern von je 39 m Spannweite, deren Haupttragelemente aus geschwungenen Fachwerkträgern mit Rohrprofilen bestehen. Die begehbare Fläche ist als orthotrope Platte ausgebildet, die aufgrund der geschwungenen Struktur der Hauptträger in verschiedenen Höhen angebunden ist. In der Draufsicht weist die Brückennachse ebenfalls einen gekrümmten Verlauf auf. In **Bild 2** sind eine isometrische Darstellung der Draufsicht und eine räumliche Ansicht der Tragstruktur abgebildet.

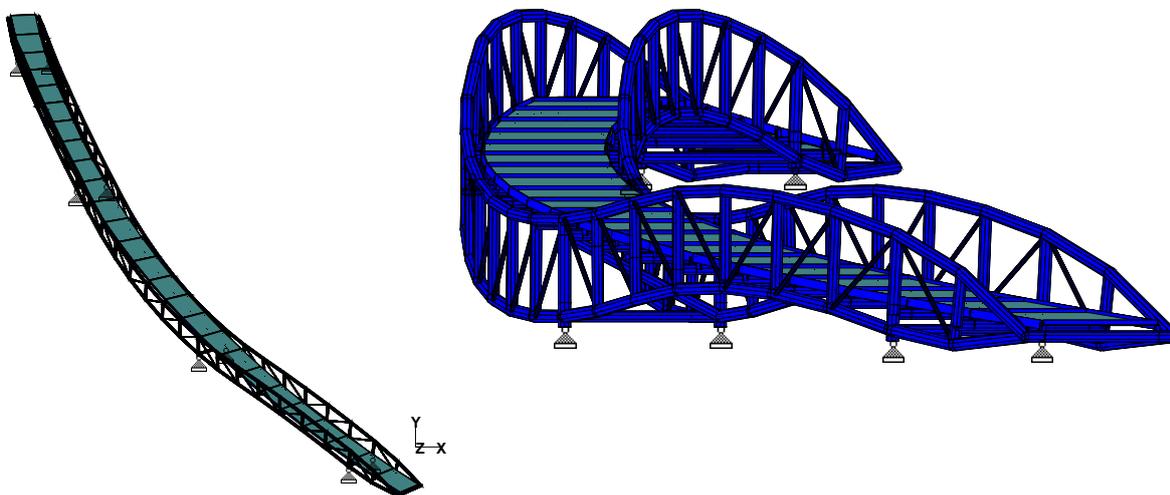


Bild 2 Draufsicht und Ansicht auf das System der Neulandbrücke Leverkusen

Der erste Berechnungsabschnitt umfasst die Modalanalyse zur Bestimmung der Eigenfrequenzen einschließlich der zugehörigen Eigenformen. Die rechnerisch ausgewiesenen Massenpartizipationsfaktoren (**Bild 3**) erlauben eine Abschätzung der Schwingungsintensitäten in den verschiedenen Eigenfrequenzen sowie eine Zuordnung der maßgebenden Schwingungsrichtung.

f_i	g	$g+0,5 \cdot p$
1	3.356	2.684
2	3.579	2.955
3	3.967	3.076
4	4.153	3.364
5	4.690	3.681
6	5.037	4.015
7	5.905	4.637
8	6.100	4.898
9	6.660	5.022

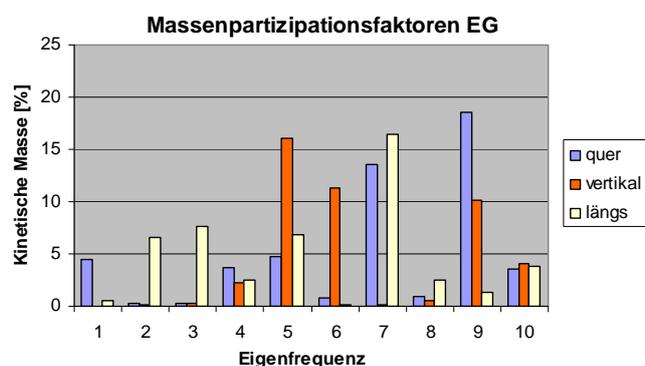


Bild 3 Berechnete Eigenfrequenzen und Massenpartizipationsfaktoren

Die wesentliche Aufgabenstellung bei der dynamischen Beurteilung von Fußgängerbrücken liegt in einer Abschätzung der zu erwartenden Beschleunigungen aus Fußgängerbetrieb, die im Regelfall als Kriterium für die Entscheidung, ob durch die Strukturdämpfung des Bauwerk eine hinreichende Reduktion der Schwingungen erreicht werden kann, oder ob externe Dämpfungsmaßnahmen erforderlich sind, verwendet werden.

Aufbauend auf wissenschaftlichen Untersuchungen zur Biomechanik des Gehens und Laufens lassen sich wirklichkeitstreue Lastfunktionen formulieren, mit denen das Berechnungsmodell in einer Time-History-Analyse beaufschlagt wird. Als Resultat der numerischen Analyse werden die zeitabhängigen Translationen, Schwinggeschwindigkeiten und Richtungsbeschleunigungen für jeden beliebigen Knotenpunkt des Strukturmodells ausgewiesen. In Bild 5 sind exemplarisch die Richtungsbeschleunigungen einer synchronisierten Einwirkung von Fußgängern mit einer Personenbelegung von $0,375 \text{ kN/m}^2$ und einer Schrittfrequenz von $2,0 \text{ Hz}$ dargestellt.

Anhand des Antwortspektrums ist festzustellen, dass die 4. und die 5. Eigenfrequenz mit der größten Intensität angeregt werden, während nur sehr geringe Anteile auf die ersten 3 Eigenfrequenzen entfallen. Der Maximalwert der Beschleunigungen in vertikaler Richtung liegt bei $a_v = 0,76 \text{ m/s}^2$. Die Querbeschleunigungen erreichen bei diesem Beispiel eine Größenordnung $a_q = 0,16 \text{ m/s}^2$. Die zugehörige maximale Vertikalverformungsamplitude im betrachteten Punkt liegt bei $z = 1,45 \text{ mm}$. Die Maximalwerte der Beschleunigungen für die betrachtete Einwirkungskonstellation, rechtfertigten eine Ausführung ohne zusätzliche Bedämpfungsmaßnahmen.

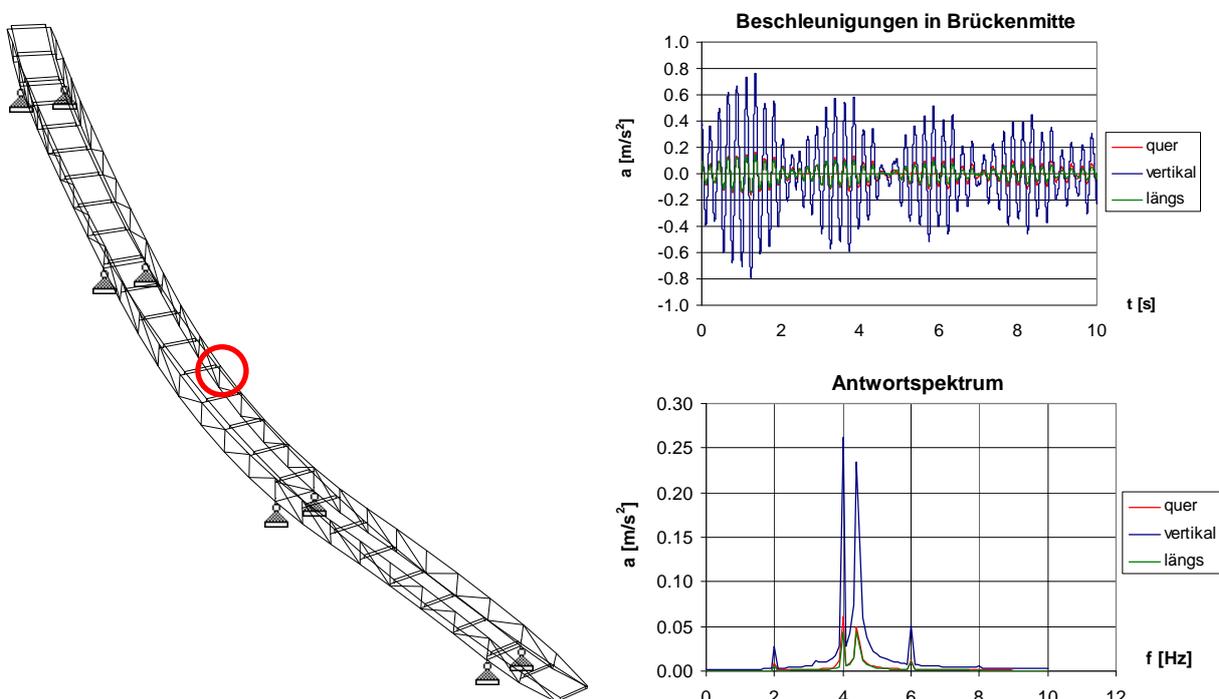


Bild 4 Berechnete Beschleunigungen und Antwortspektren bei einer Schrittfrequenz von $2,0 \text{ Hz}$

Analog zur beschriebenen Vorgehensweise lassen sich beliebige Einwirkungskonstellationen berechnen, die eine umfassende Bewertung der dynamischen Tragwerksreaktionen bereits im Planungsstadium gestatten.

Bedämpfung durch Anordnung vertikaler Schwingungsdämpfer

Während beim zuvor betrachteten Beispiel eine zusätzliche Bedämpfung des Bauwerkes nicht erforderlich war, erforderte die exponierte Lage des nachfolgend diskutierten Bauwerks den Einbau zusätzlicher Schwingungsdämpfer. Es handelt es sich um die Fußgängerbrücke Brücke „de Abandoibarra“ im Zentrum der spanischen Metropole Bilbao, bei der durch den Einbau von vertikal wirkenden Schwingungsdämpfern die Bewegungen reduziert wurden. Die messtechnischen Untersuchungen und das Dämpfungskonzept der Brücke werden in diesem Abschnitt erörtert. Das Tragwerk besteht aus einem mit leichtem Bogenstich ausgeführten Hauptträger einer Gesamtlänge von 142 m, der durch seitlich ausspreizende Rampen- und Treppenabzweigungen unterstützt ist. Die als Trog ausgeführten Gehwege und Rampen sind aus nichtrostendem Stahl gefertigt. Die Brücke ist in **Bild 5** in der Ansicht schematisch mit der Angabe der Hauptabmessungen dargestellt. Die komplexe Tragstruktur unter Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Unterbauten, Pfahlgründungen am Rampenansatz, bedingte die Entscheidung, die schwingungstechnischen Kenngrößen der Konstruktion auf messtechnischem Weg zu ermitteln. Die Ergebnisse numerischer Analysen wären bei dieser aufgelösten Konstruktion mit den schwer einzuschätzenden Randbedingungen zu unsicher gewesen.

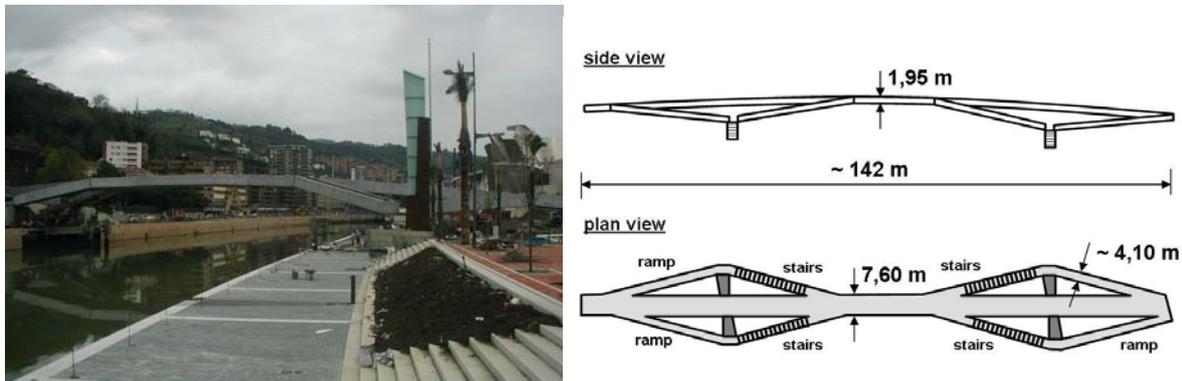


Bild 5 Ansicht und Hauptabmessungen der Brücke De Abandoibarra in Bilbao

Schwingungsmessungen nach weitgehender Fertigstellung der Konstruktion lieferten Aufschlüsse über die maßgebenden Eigenfrequenzen und Eigenformen mit den Stellen maximaler Schwingungsamplituden. Im Anregungsspektrum der wahrscheinlichen Schrittfrequenzen aus Fußgängerbetrieb konnten 3 Schwingungsformen identifiziert werden. Die im Rahmen des Versuchsprogramms festgestellte Eigendämpfung der Struktur hätte für regelmäßig wiederkehrende Einwirkungssituationen eines normalen Fußgängerbetriebs bei einer nicht in exponierter Lage stehenden Brücke für eine hinreichend sichere Reduktion der Beschleunigungen ausgereicht. Aufgrund der Lage des Bauwerks im kulturellen Zentrum der Stadt und der lokalen Besonderheit, dass bei Feierlichkeiten nach Siegen des örtlichen Profi-Fußballvereins das Publikum von den Kanalbrücken aus mit den auf einem Boot vorbeifahrenden Spielern feiert, wurde die Entscheidung getroffen, das Bauwerk zu bedämpfen.

Das Dämpfungskonzept umfasste die Anordnung von vertikalen Schwingungsdämpfern in den Wänden der Trogkonstruktion, die hinter einer durchlaufenden Holzverblendung für Passanten unsichtbar untergebracht werden mussten. Dadurch wurde die Formgebung der Masse-Tilger-Komponenten beeinflusst. Die Anordnung der Schwingungsdämpfer ist in **Bild 6** in der Draufsicht dargestellt. Dabei wurden für die zu bedämpfende Eigenfrequenz jeweils paarweise Dämpfer in Brückenmitte, im Rampenanschnitt und in einem Viertelpunkt des Hauptträgers eingebaut. Zum Einsatz kamen Schwin-

gungsdämpfer mit elektronischer Steuerung, die von der Firma Maurer Söhne, München im Rahmen eines europäischen Forschungsprogramms entwickelt wurden [3].

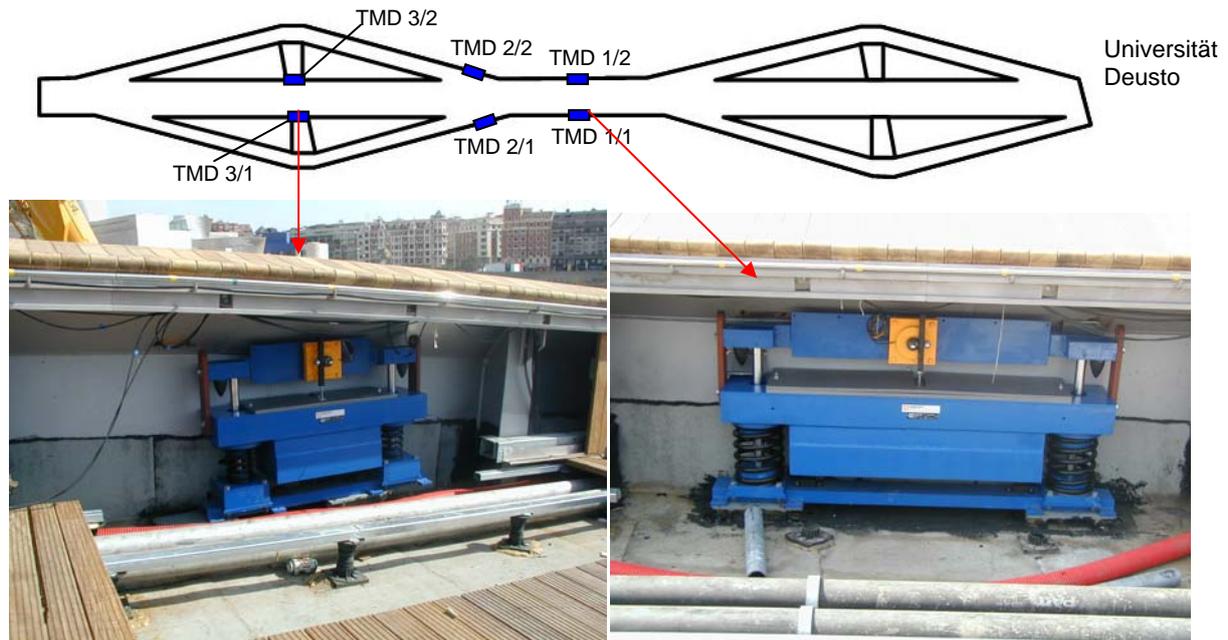
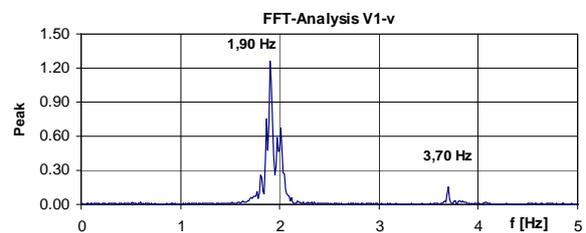
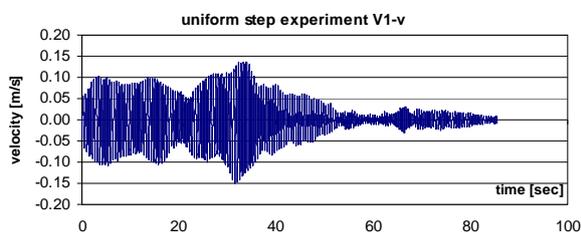


Bild 6 Montageplätze der 6 vertikalen Dämpfungseinheiten in den Trogwänden des Bauwerks

Zur Verifikation der Wirkung des Dämpfungskonzepts wurde eine neuerliche Messkampagne nach Abschluss der Montagearbeiten durchgeführt. In **Bild 7** sind exemplarisch die Messreihen der vertikalen Schwinggeschwindigkeiten in Brückenmitte mit den zugehörigen Frequenzspektren für synchronisierte Überschreitungsversuche mit 20 Personen zusammengestellt. Zunächst erfolgte der Versuch in einer Konfiguration, in der die Tilgermasse durch Verschraubung der Transportsicherung blockiert war. Anschließend wurde der Versuch mit aktivierten Dämpfern wiederholt. Die Messschriebe weisen bei annähernd übereinstimmender Testfolge eine deutliche Reduzierung der Schwinggeschwindigkeiten aus. Während mit blockierten Dämpfern im Frequenzspektrum die zu bedämpfende Grundfrequenz $f_1 = 1,8$ Hz dominant ist, wird deren Intensität mit aktiven Dämpfern signifikant reduziert. Ergänzt durch lokale Anregungsversuche konnte in gleicher Weise die Wirkung der übrigen Dämpfer bestätigt werden.

blockierte Tilgermasse



aktivierte Dämpferelemente

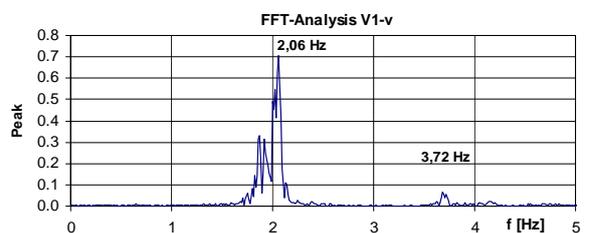
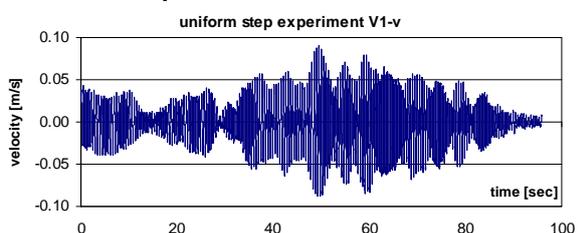


Bild 7 Beschleunigungen und Frequenzspektren für lokale Anregung mit 20 Personen ($f_s = 2,0$ Hz)

Bedämpfung einer Struktur gegen horizontale Schwingungen

Im Regelfall bedingen fußgängerinduzierte Schwingungen die Erforderlichkeit einer vertikalen Bedämpfung. Als Beispiel für eine Brücke, bei der die horizontalen Schwingungen zu reduzieren waren, wird nachfolgend das Dämpfungskonzept der Fußgängerbrücke Port Tawe in Swansea/Großbritannien vorgestellt. Neben der Schwingungsanregung durch von Fußgängern abgesetzte Kräfte quer zur Brückenachse waren hier auch windinduzierte Schwingungen, begünstigt durch die einseitige Ausrichtung zum offenen Meer, zu beachten.

Bei der Fußgängerbrücke handelt es sich um einen in der Draufsicht gekrümmten Hauptträger, der einseitig mit Schrägseilen an einem geneigten Pylon abgehängt ist (**Bild 8**). Die Gesamtlänge der Brücke beträgt annähernd 140 m.

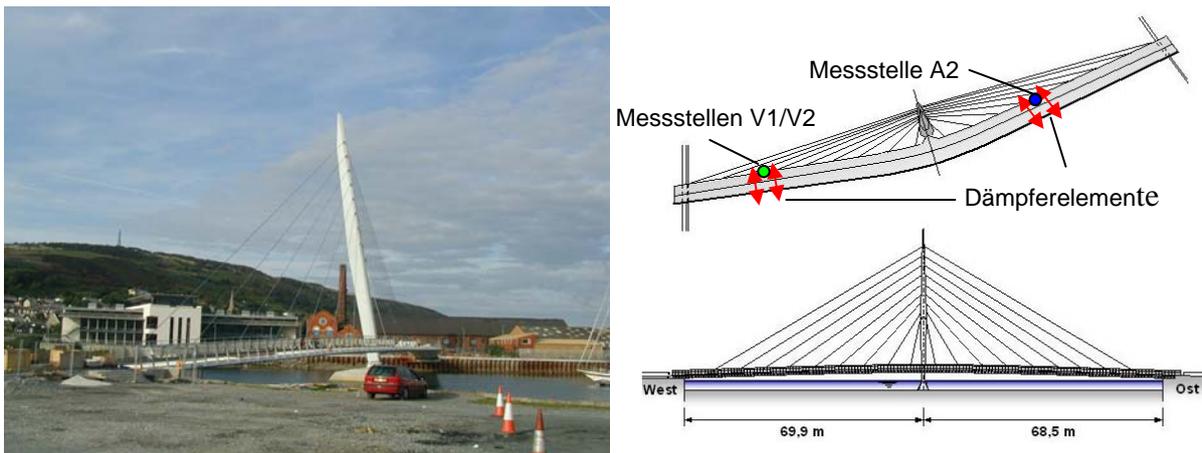


Bild 8 Ansicht und Abmessung der Fußgängerbrücke Port Tawe in Swansea UK

Der Querschnitt des Brückenhauptträgers verfügt über eine trapezförmige Hohlkastenkontur aus zusammengeschweißten Stahlblechen. Auf der den Seilansschlägen abgewandten Seite ist auskragend ein Fahrradweg angehängt, der mit einer Aluminiumbeplankung ausgeführt ist. Aufgrund der Zugänglichkeit wurden die insgesamt 4 horizontalen Dämpfungseinheiten mit definierter Masse und Federabstimmung in den Positionen gemäß Bild 8 unter dem Fahrwegbelag entsprechend der Skizze in **Bild 9** eingebaut. Bei den Dämpfern handelt es sich um an die Platzverhältnisse angepasste, horizontal geführte Tilgermassen (je 1900 kg) mit 4 Federn und einer Frequenzabstimmung auf $f = 1,22$ Hz. Die erforderliche Dämpfung wurde durch viskose Dämpferelemente, deren Feinabstimmung im Rahmen von Labortests an der Universität der Bundeswehr in München vorgenommen wurde, realisiert.

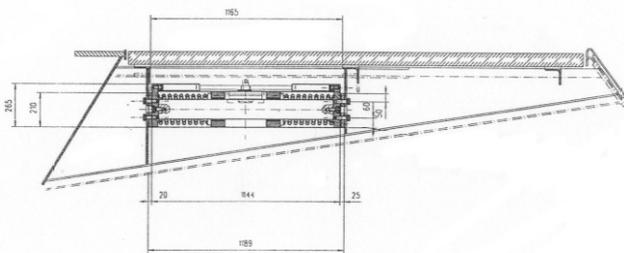


Bild 9 Dämpfer im Fahrradweg



Bild 10 Ansicht eines horizontalen Dämpfers

Die Konfektionierung der Dämpfer und der Tilgermassen erfolgte auf Grundlage numerischer Modalanalysen. Um Abweichungen zwischen den berechneten und messtechnisch bestätigten Eigenfrequenzen begegnen zu können, wurden die Dämpfer so konzipiert, dass die Tilgermassen durch Zugabe bzw. Wegnahme von Blechen modifiziert werden konnten.

Die messtechnische Überprüfung der Dämpferfunktion am Bauwerk erfolgte im Juni 2003. Die Schwingungsanregung der Konstruktion erfolgte durch Anzupfversuche, indem der Brückenhauptträger durch einen Seilzug seitlich ausgelenkt wurde. In den Belastungsstrang wurde eine Sollbruchstelle mit einer definierten Bruchlast eingebaut. Hinsichtlich dieser Anregungskonstellation mit verschiedenen Bruchlasten konnten sowohl die Eigenfrequenzen mit deren Schwingungsintensitäten, als auch die Strukturdämpfung der Konstruktion ermittelt werden. Die Anzupfversuche erfolgten zu Vergleichszwecken zunächst mit blockierten und danach mit aktivierten Dämpferelementen. In **Bild 11** sind exemplarisch zwei Messkurven der Beschleunigungen mit blockierten und aktivierten Dämpfern graphisch aufgetragen, aus denen die Funktion der Dämpfer hervorgeht. Die Lage der Messstelle A2 ist in Bild 11 markiert.

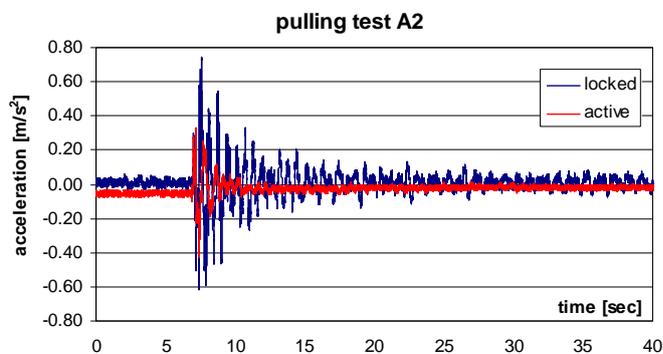


Bild 11 Vergleich der Beschleunigungskurven aus den Anzupfversuchen

Zur Verdeutlichung der Schwingungsanalysen und der Interpretation der Messergebnisse sind in **Bild 12** die Antwortspektren des vertikalen Schwinggeschwindigkeitssensors V1 und in **Bild 13** des horizontalen Schwinggeschwindigkeitssensors V2 in übereinstimmender Position gemäß Bild 8 für verschiedene Auslenkungskräfte dargestellt. Anhand der Schwingungsintensitäten ist ein annähernd linearer Zusammenhang zur Auslenkungskraft zu erkennen. Die Darstellung der horizontalen Antwortspektren in Bild 16 verdeutlicht aber auch, dass die dominante horizontale Grundfrequenz $f_{1h} = 1,25$ Hz bedämpft werden konnte.

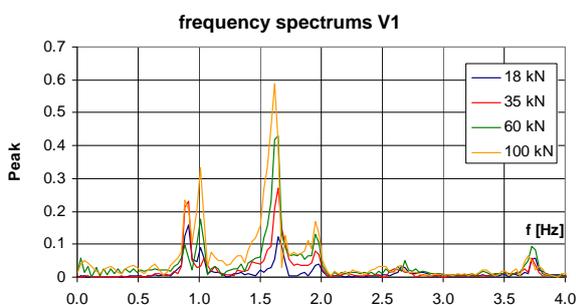


Bild 12 Frequenzspektren vertikal

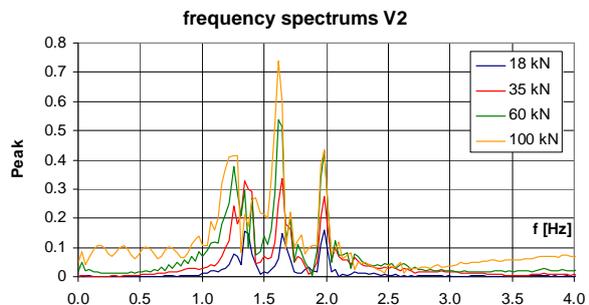


Bild 13 Frequenzspektren horizontal

Besonderheiten bei Schrägseilbrücken

Eine andere Kategorie von schwingungsanfälligen Brückensystemen sind die Schrägkabelbrücken. Als Beispiel für diesen Brückentyp werden nachfolgend die theoretischen und messtechnischen Schwingungsuntersuchungen an der Fußgängerbrücke Bennauer Steg nahe Schindeleggi bei Zürich in der Schweiz erläutert. Dabei handelt es sich um eine Schrägkabelbrücke, bei der ein ca. 82 m langes Haupttragsystem an einem schräg aufgestellten Pylon abgehängt ist. Die Ansicht des Systems mit den Hauptabmessungen ist in **Bild 14** dargestellt. **Bild 15** vermittelt einen Eindruck des Bauwerks in der Umgebung. Der Versteifungsträger besteht aus zwei außen angeordneten Rohrprofilen, die durch Querträger im Abstand von 2,0 m miteinander verbunden sind. Darauf aufgelegt sind Nebenlängsträger aus Walzprofilen, die der Aufnahme des Gehwegbelags aus Granitblöcken dienen. Entsprechend **Bild 16** ist das Geländer mit Verbundsicherheitsgläsern verblendet.

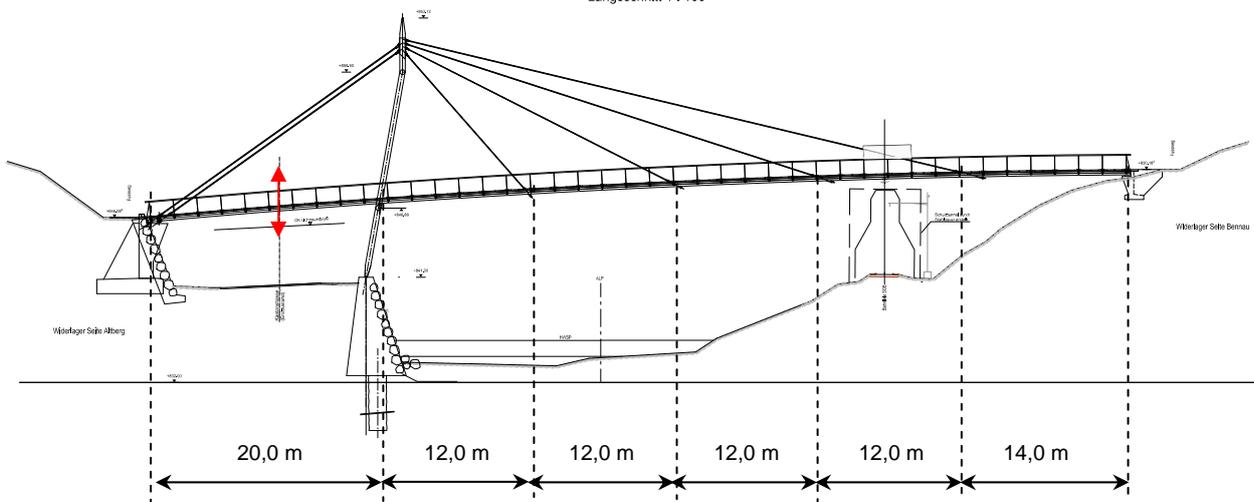


Bild 14 Ansicht der Fußgängerbrücke Bennauer Steg mit Hauptabmessungen



Bild 15 Querschnitt mit Abmessungen

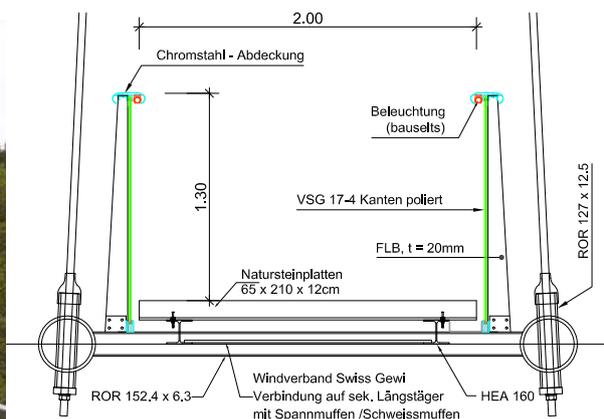


Bild 16 Ansicht des Gehwegs im Endzustand

Messtechnische Schwingungsanalysen und die Beurteilung der ausgewiesenen Antwortspektren stellen bei den Schrägkabelsystemen eine anspruchsvolle Aufgabenstellung dar, da die Frequenzspektren der ausgewerteten Messsignale nachhaltig vom Schwingungsverhalten der Seile beeinflusst werden. Die Interpretation der Messergebnisse wird durch analytische Betrachtungen zu den von der Seillänge, der Seilkraft und der Massenbelegung abhängigen Eigenfrequenzen wesentlich erleichtert. Die berechneten Grundfrequenzen der Schrägseile des Bennauer Stegs sind in **Bild 17** graphisch aufgetragen.

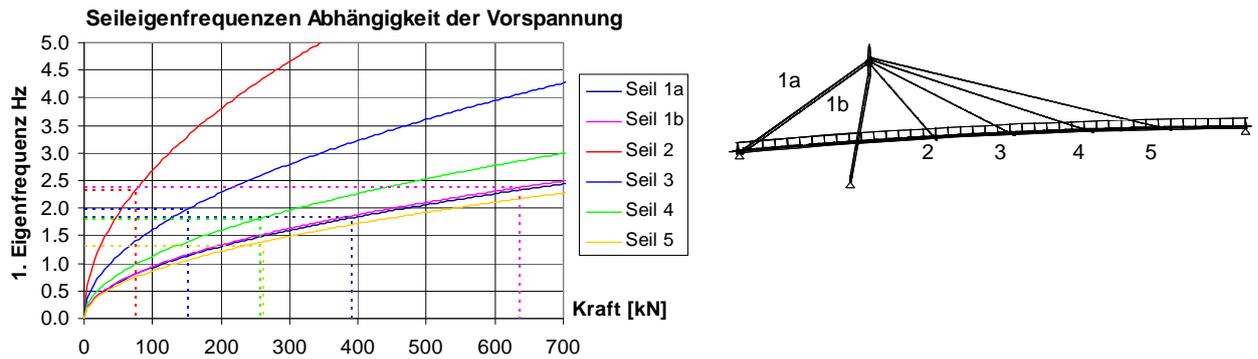


Bild 17 Rechnerische Eigenfrequenzen der Schrägkabel in Abhängigkeit von der Seilkraft

Als weitere Besonderheit bei Seilen ist zu nennen, dass die höheren Eigenfrequenzen jeweils Vielfache der Grundfrequenzen sind. Daher ist es möglich, die Schwingungseigenschaften der Seile im Frequenzspektrum von den Eigenfrequenzen des Hauptträgers zu unterscheiden. In **Bild 18** ist ein kurzer Zeitabschnitt aus einer Messreihe der ambienten Schwingungen (2 Sekunden) mit dem zugehörigen Frequenzspektrum dargestellt. Die Eigenfrequenz bei 1,6 Hz mit den Vielfachen 3,16 Hz, 4,78 Hz, 6,44 Hz und 8,12 Hz können den Seilschwingungen zugeordnet werden, die sich auch den Messaufzeichnungen am Hauptträger abzeichnen. Die weiteren Eigenfrequenzen bei 1,94 Hz, 2,75 Hz und 3,83 Hz sind dem Hauptträger und dem Pylon zuzurechnen.

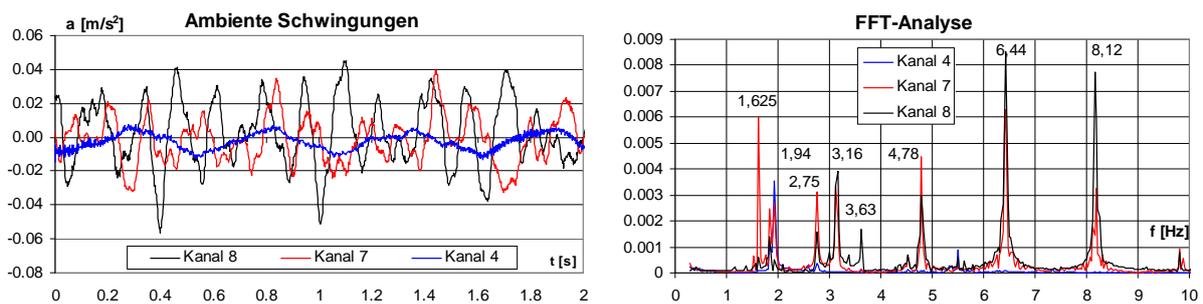


Bild 18 Ausschnitte aus den Messreihen und FFT-Analysen der ambienten Schwingungen

Ein Aufschwingversuch mit 13 Personen in einer Einwirkungsfrequenz von $f_e = 1,6$ Hz an der in Bild 14 durch einen roten Pfeil markierten Position lieferte nach abruptem Abbruch der Anregung an der Position der Lasteinwirkung (Kanal 8) und am Pylon (Kanal 7) die in **Bild 19** aufgezeichneten Messkurven. Im Frequenzspektrum zeichnen sich deutlich die Eigenfrequenzen der Seile bei 1,6 Hz mit deren Vielfachen ab. Schon die Größe der aufgezeichneten Beschleunigungsamplituden zeigt deutlich die erforderliche Anordnung zusätzlicher Dämpfungsmaßnahmen sowohl am Versteifungsträger als auch an den Seilen.

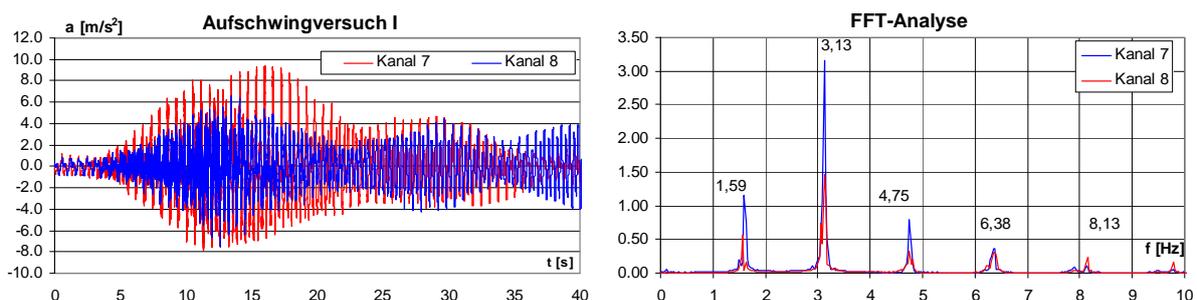


Bild 19 Aufschaukeln durch 13 Personen im 20 m langen Randfeld

Zusammenfassung

Im Rahmen der vorangegangenen Kapitel wurden theoretische Überlegungen zur technischen Handhabung schwingungsanfälliger Bauwerke vorgestellt und die Bewertung der Schwingungskenngrößen einschließlich erforderlicher Dämpfungsmaßnahmen anhand von praktischen Beispielen aus dem Bereich der Fußgängerbrücken erläutert. Bei einfachen Gründungsverhältnissen und klar modellierbaren Tragwirkungen können die modalen Kenngrößen sowie die unter fußgängerspezifischen Lastwirkungen zu erwartenden dynamischen Beanspruchungskenngrößen numerisch ermittelt werden. Häufig werden jedoch messtechnische Untersuchungen entweder zur Absicherung dynamischer Berechnungen oder zur exakten Identifizierung der Eigenfrequenzen und Eigenformen durchzuführen sein. Für die Aufgabenstellung eignen sich Messverfahren mit Schwinggeschwindigkeitssensoren oder Beschleunigungsaufnehmern, für die Aufzeichnungen von Schwingbewegungen können auch induktive Wegaufnehmer oder Lasermesssysteme eingesetzt werden. Bei einer sorgfältig geplanten Anordnung der Messfühler sind bei hinreichend feiner Abtastrate und zeitgleicher Messwerterfassung an sämtlichen Messgebern auch die Eigenformen und die Dämpfungswerte der einzelnen Eigenfrequenzen zu bestimmen.

Personeninduzierte Schwingungen sind bei den schlanken Fußgängerbrücken des Stahl- und Verbundbaus nahezu unvermeidbar. Im Kontext internationaler technischer Standards und Fachpublikationen sind Grenzwerte der zulässigen Beschleunigungen oder Verformungsamplituden definiert, bei deren Berücksichtigung Schwingungen in den überwiegenden Fällen kaum wahrnehmbar sind, und die den uneingeschränkten Benutzungskomfort gewährleisten. Bei stärker ausgeprägten Schwingungen kann nicht ausgeschlossen werden, dass Fußgänger die Schwingungen als störend empfinden und die Brücke nicht annehmen. In diesen Fällen ist es sinnvoll, die Schwingungen des Bauwerks durch die Anordnung von Dämpfungssystemen zu reduzieren. Diese stellen im Regelfall individuelle Sonderanfertigungen dar, die von Fachingenieuren ausgelegt und von Fachfirmen konfektioniert werden.

Schrifttum

- [1] Petersen Christian
Dynamik der Baukonstruktionen, Vieweg Verlag, Braunschweig, 2000, ISBN 3-528-08123-6

- [2] Bachmann H., Ammann W.
Schwingungsprobleme bei Bauwerken. Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, Zürich 1987, ISBN 3 85748 051 3

- [3] Maurer Soehne GmbH & Co.KG
Tuned Mass an Viscous Dampers, Technical Information and product, Stand 2004

- [4] Gerb Schwingungsisolierungen GmbH & Co KG
Schwingungsisolierungen, 9. Auflage 1992

- [5] Petersen Christian
Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau
Maurer Söhne GmbH & Co. KG, München 2001, ISBN 3-00-008059-7

- [6] Bachmann Hugo
"Lebendige" Fußgängerbrücken – eine Herausforderung
Ernst und Sohn, Bautechnik 81 (2004), Heft 4

- [7] Footbridge 2002
Design and dynamic behaviour of footbridges, Proceedings of the International Footbridge Conference (Paris), AFGC and OTUA, Paris 2002

- [8] Grundmann H., Kreuzinger H., Schneider M.
Schwingungsuntersuchungen für Fußgängerbrücken.
Bauingenieur 68 (1993)