

# Rätselhaftes Schwingungsverhalten von Fussgängerbrücken

---

Benedikt Weber und Glauco Feltrin

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, CH-8660 Dübendorf

## Einleitung

Fussgängerbrücken sind im Allgemeinen relativ einfache Tragwerke und zeigen ein übersichtliches Schwingungsverhalten. Häufig handelt es sich um einfache Balken mit der bekannten Folge von Biege- und Torsionsschwingungen. Hin und wieder zeigen Messungen jedoch ein zunächst rätselhaftes Verhalten, das erst mit zusätzlichen Messungen oder durch numerische Studien verstanden werden kann.

Wir zeigen im Folgenden zwei solche Fälle, die auch für den erfahrenen Dynamiker nicht auf den ersten Blick verständlich sind. Beide Beispiele waren Teil eines Forschungsprojektes, bei dem es um den Einfluss der Temperatur auf den Asphalt und damit auf das Schwingungsverhalten von Fussgängerbrücken ging [1]. Dieser Aspekt wird hier nicht diskutiert. Jedoch zeigten sich bei den dynamischen Messungen weitere interessante Schwingungsverhalten, die etwas unerwartet und nicht einfach zu interpretieren waren.

## Erstes Beispiel

Bei dieser Brücke handelt es sich um eine Radwegbrücke bestehend aus einem Einfeldträger über 40 m Spannweite und einer Gesamtbreite von 3.96 m. Der Trogquerschnitt aus Stahl besteht aus zwei seitlichen tragenden Brüstungen aus allseitig geschlossenen luftdicht geschweissten Hohlkastenprofilen, die alle 4 m mit Querschotten ausgesteift und durch Querträger verbunden sind. Eine Stahlplatte mit Längsrippen zwischen den Brüstungen dient als Verkehrsfläche. Die Brücke ist auf einer Seite in Längsrichtung fest und auf der andern Seite in Längsrichtung verschieblich gelagert. Die Widerlager aus Stahlbeton wurden auf Mikropfählen fundiert. Die Brücke ist in Abbildung 1 zu sehen.



Abbildung 1: Radwegbrücke, erstes Beispiel

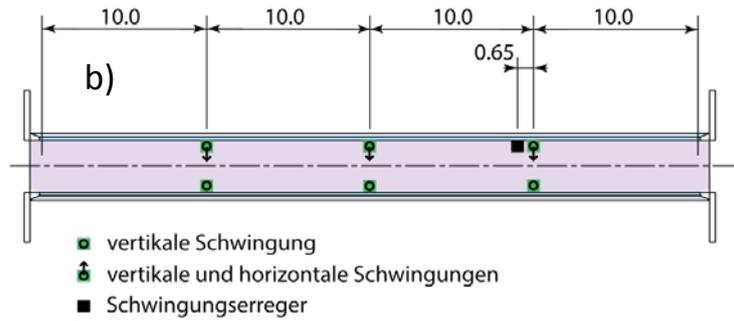


Abbildung 2: a) Beschleunigungsaufnehmer und b) Auslegung der Messpunkte

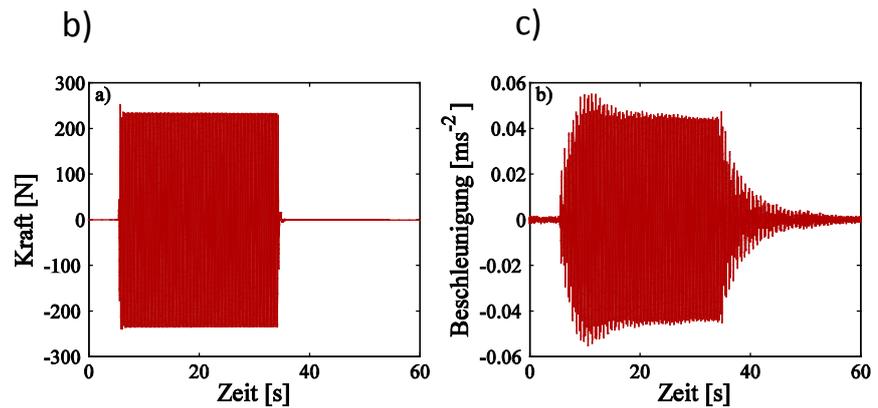
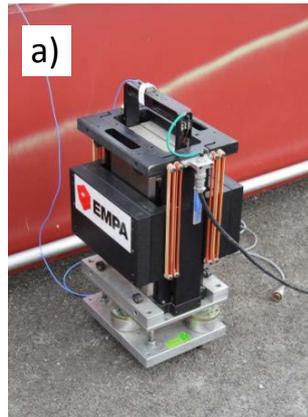


Abbildung 3: a) Shaker, b) harmonische Anregung, c) gemessene Beschleunigung mit Ausschwingvorgang

Im Rahmen eines Forschungsprojektes [1] hatte die Empa die Möglichkeit, das dynamische Verhalten der Brücke direkt nach dem Versetzen und später nach Einbau des Gussasphaltbelages experimentell zu ermitteln.

Beschleunigungen wurden mittels hochempfindlichen Beschleunigungssensoren gemessen, die auf Grundplatten montiert wurden. Ein Messpunkt mit zwei Sensoren ist in Abbildung 2a) zu sehen. Sechs Messpunkte wurden gemäss Abbildung 2b) angeordnet. Die sechs vertikalen Sensoren werden benötigt um sowohl Biege- wie auch Torsionsschwingungen zu erfassen. Horizontale Aufnehmer wurden eingesetzt, um die Querschwingung zu erfassen, die sich allerdings als unbedeutend herausstellte.

Die Anregung erfolgte mit einem elektromechanischen Shaker, wie er in Abbildung 3a) zu sehen ist. Zunächst wurde eine Breitbandanregung (Rauschen) benützt, um die Eigenfrequenzen zu bestimmen. Dann wurden die einzelnen Schwingungsformen gezielt durch eine harmonische Kraft angeregt (Abbildung 3b). Nach Erreichen des stationären Zustandes wurde der Shaker gestoppt und der Ausschwingvorgang gemessen, um daraus die Dämpfung zu bestimmen (Abbildung 3c).



Abbildung 4: a) Provisorisches Lager, b) definitives verschiebliches Lager mit Gleitplatte

**Tabelle 1: Gemessene Eigenfrequenzen und Dämpfungen vor Einbau des Asphaltbelags**

Eigenschwingung	Typ	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
B1	Biegung	1.92	4.45
T1	Torsion	3.89	1.45
B2	Biegung	6.39	0.25

Nach dem Einheben wurde die Brücke zunächst auf provisorische Lager gestellt (Abbildung 4a). Diese bestehen aus einem Stapel von einem Profil und mehreren Stahlplatten. Diese Konstruktion ermöglicht, dass geringe Horizontalverschiebungen, wie sie bei Schwingungen auftreten, aufgenommen werden können. Dabei wird durch Reibung auch eine beträchtliche Dämpfung produziert.

Die gemessenen Eigenfrequenzen und Dämpfungen sind in Tabelle 1 angegeben. Auffallend ist, dass die Grundschiwingung eine Frequenz von ungefähr 2 Hz aufweist, und damit genau den kritischen Wert für eine Anregung durch Fussgänger annimmt. Nach der Norm SIA 260 sollten Eigenfrequenzen im Bereich zwischen 1.6 und 4.5 Hz vermieden werden. Trotz der kritischen Eigenfrequenz wurde die Brücke durch Hüpfen nicht übermässig angeregt, da die Dämpfung unerwartet hoch war. Für geschweisste Stahlkonstruktionen würde man normalerweise nur eine Dämpfung von etwa 0.2–0.3 % erwarten. Hier war die Dämpfung dank Reibung in den provisorischen Lagern mehr als 10-mal so gross.

Bereits in der Planungsphase hatte man erkannt, dass die Brücke eine kritische Grundfrequenz aufweisen würde. Man entschied sich daher, den Asphaltbelag so zu dimensionieren, dass durch die Erhöhung der Masse die Eigenfrequenz unter 1.6 Hz sinken würde. Deshalb wurde ein Gussasphaltbelag von insgesamt 8 cm Stärke in drei Schichten eingebaut. Dies ist relativ dick im Vergleich zu den üblichen Stärken von 4–5 cm.

Die gemessenen Eigenfrequenzen und Dämpfungen nach Aufbringen des Belages sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Zum Vergleich wurden auch die Werte vor Aufbringen des Belags wiederholt. Da bekannt war, dass die Temperatur einen Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften haben kann, wurden Messungen bei warmem und kaltem Wetter durchgeführt. Dieser Einfluss war aber eher unbedeutend, da die Asphaltsschicht in der Nähe der neutralen Achse des Querschnitts liegt. Gezeigt sind die Werte bei warmem Wetter.

Die Messungen zeigen ein doch etwas überraschendes Bild. Die Grundfrequenz ist praktisch gleich geblieben wie vor dem Aufbringen des Asphaltbelages, während die Dämpfung etwa halbiert wurde. Wenn man höhere Schwingungsformen betrachtet, sieht man, dass auch die Eigenfrequenz der Torsionsschwingung praktisch unverändert geblieben ist. Wie kann man ein solches Verhalten erklären?

Zunächst muss bemerkt werden, dass bei der zweiten Messung nicht nur der Asphalt aufgebracht sondern auch die provisorischen Lager durch definitive ersetzt worden waren. Auf einer Seite wurde

**Tabelle 2: Gemessene Eigenfrequenzen und Dämpfungen vor und nach Einbau des Asphaltbelags**

Eigenschwingung	Typ	ohne Belag		mit Belag	
		Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]	Frequenz [Hz]	Dämpfung [%]
B1	Biegung	1.92	4.45	1.82	1.98
T1	Torsion	3.89	1.45	3.91	1.25
B2	Biegung	6.39	0.25	5.34	0.32

**Tabelle 3: Vergleich der gemessenen Eigenfrequenzen [Hz] mit Resultaten aus zwei FE-Modellen, vor und nach Einbau des Asphaltbelags**

Mode	ohne Belag / provisorische Lager			mit Belag / definitive Lager		
	Gemessen	Verschieblich	Unverschieblich	Gemessen	Verschieblich	Unverschieblich
B1	1.92	1.71	2.27	1.82	1.41	1.87
T1	3.89	3.90	4.19	3.91	3.65	3.94
B2	6.39	6.53	6.53	5.34	5.31	5.31

ein Linienkipplager, auf der andern Seite ein horizontal verschiebliches Gleitlager eingebaut. Das verschiebliche Lager ist in Abbildung 4b) zu sehen. Die Verschieblichkeit wird durch eine Gleitplatte bewerkstelligt, die mit Teflon beschichtet ist. Das Gleitlager ist für Längenänderungen der Brücke infolge Temperaturschwankungen dimensioniert. Bei kleinen Deformationen, wie sie bei Schwingungen auftreten, ist die Reibung so gross, dass das Lager als nur teilweise verschieblich betrachtet werden kann.

Eine Finite-Elemente-Berechnung gibt näher Aufschluss darüber, wie sich die Brücke bei fixer und bei verschieblicher Lagerung verhält. Der Vergleich mit den gemessenen Werten ist in Tabelle 3 wiedergegeben. Bei der Grundschiwingung verhalten sich die provisorischen Lager teilweise verschieblich. Die horizontale Bewegung der Lager scheint auch die grosse Dämpfung dieser Schwingung zu erklären. Für die Torsionsschiwingung sind die Lager weitgehend verschieblich. Die definitiven Lager verhalten sich jedoch praktisch unverschieblich. Trotzdem scheint bei der Grundschiwingung eine minimale Bewegung stattzufinden, die durch Reibung eine nicht unbedeutende Dämpfung erzeugt.

Interessant ist auch, dass sich die Reibung im Gleitlager nicht bei allen Schwingungsformen gleich auswirkt. So ist die Frequenz der zweiten Beigeform (B2) völlig unbeeinflusst. Dies lässt sich aus der Antisymmetrie dieser Schwingung erklären. Bei symmetrischen Schwingungsformen ändert sich die Länge der Brückenunterkante bei verschieblicher Lagerung. Wenn diese Längenänderung behindert wird, wirkt das Lager wie eine teilweise Einspannung. Anders bei antimetrischen Formen, bei denen sich die Länge der Unterkante auch bei freier Lagerung nicht ändert.

Zum Schluss kann bemerkt werden, dass die Brücke trotz ihrer kritischen Eigenfrequenz in der Nähe von 2 Hz keine Schwingungsprobleme verursacht. Dies ist einerseits auf die erhöhte Masse und andererseits auf die immer noch beträchtliche Dämpfung zurückzuführen. Durch Hüpfen einer Person in Brückenmitte mit einer Frequenz von 1.8 Hz erreichen die Schwingungen einen Maximalwert von  $0.15 \text{ m/s}^2$ , was immer noch unter dem Richtwert von  $0.5 - 1.0 \text{ m/s}^2$  liegt.

## Zweites Beispiel

Das zweite Beispiel ist eine Radwegbrücke, die als einfeldrige Trogbücke aus Stahl mit einer Spannweite von 17.2 m und einer Breite von 3.6 m ausgebildet ist. Für die beiden Längsträger wurden Fachwerkträger eingesetzt, welche alle 1.325 m durch Querträger verbunden sind, auf denen die Fahrbahnplatte aufgeschweisst wurde. Die Brücke ist auf beiden Seiten auf je zwei Elastomerlagern schwimmend gelagert. In die Foundation der neuen Widerlager aus Stahlbeton wurden je zwei 6 m lange Injektionsrammpfähle integriert. Auf der Fahrbahn wurde ein Gussasphalt mit 6 cm Stärke aufgebracht. Die Brücke ist in Abbildung 5a) in einer Gesamtansicht abgebildet. Abbildung 5b) zeigt die Untersicht der Fahrbahnplatte mit Querträgern und Längsrippen. Auch bei dieser Brücke wurden Schwingungsmessungen vor und nach dem Einbau des Asphaltbelages durchgeführt.

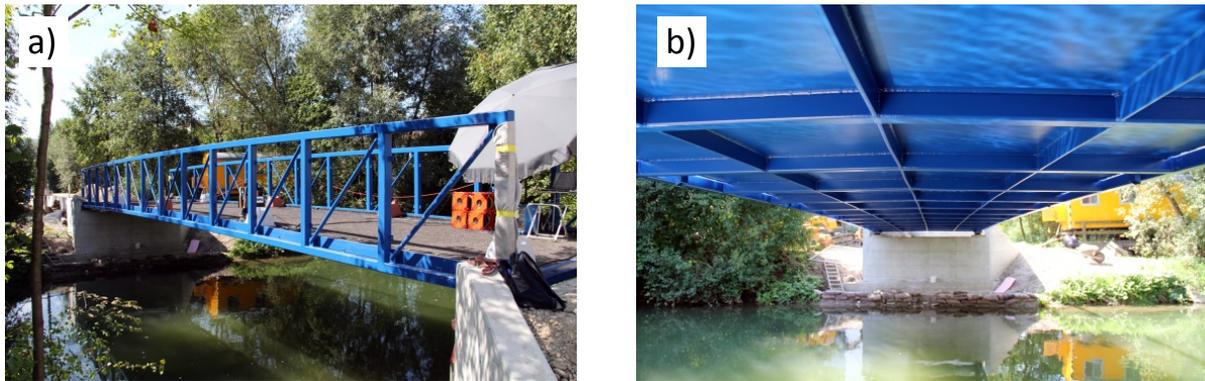


Abbildung 5: Radwegbrücke, zweites Beispiel: a) Gesamtansicht, b) Untersicht der Fahrbahnplatte mit Querträgern und Längsrippen

Das Verhalten der Brücke ist einfacher zu verstehen, wenn man von einem Finite-Elemente-Modell ausgeht. Die Fachwerkträger wurden mit Balkenelementen modelliert, ebenso wie auch die Querträger und die Längsrippen der Fahrbahnplatte, die zusammen einen Trägerrost bilden. Darauf liegt die Stahlplatte der Fahrbahn und auf dieser wiederum die Asphaltenschicht, die beide als Platten modelliert wurden. Dabei muss beachtet werden, dass die Stahlplatte exzentrisch am Trägerrost angeschlossen ist und die Asphaltenschicht wiederum exzentrisch an der Stahlplatte. Dieses Problem wurde so gelöst, dass die Stahlplatte und die Asphaltenschicht mit unabhängigen Freiheitsgraden beschrieben werden. Dies ist beim verwendeten FE-Programm (COMSOL Multiphysics) Standard. Für die Kopplung wurden Zwangsbedingungen in den entsprechenden Freiheitsgraden eingeführt. Die vertikalen Verschiebungen wurden gleich gesetzt, während für die horizontalen Verschiebungen zusätzlich der Einfluss der Rotation (Biegung und Torsion) berücksichtigt wurde. Die Lager wurden als Federn in vertikaler und horizontaler Richtung mit unterschiedlichen Steifigkeiten gemäss Herstellerangaben modelliert.

Das Modell ist in Abbildung 6 zu sehen. Trotz relativ grober Elementierung besitzt das Modell ohne Asphaltenschicht immer noch rund 4000 Freiheitsgrade, mit Asphalt rund 7000.

Wegen der weichen horizontalen Lagerung bewegt sich die Brücke in den ersten drei Eigenformen wie ein Starrkörper. Diese Formen sind in der oberen Zeile von Abbildung 7 zu sehen.

Die nächsten drei Formen sind zwei Biegeformen und eine Torsionsform, zu sehen in der zweiten Zeile von Abbildung 7. Obwohl die Brücke im Prinzip einen einfachen Balken darstellt, sind die Schwingungsformen hier etwas komplizierter. Da die Brücke relativ kurz und breit ist, verhält sich die Fahrbahn wie eine zweiseitig aufgelegte Platte. Durch die Querbiegung der Fahrbahn werden auch die beiden Fachwerkträger aus ihrer Ebene verformt. Dies ist besonders bei der zweiten Biegeform (B2) klar zu sehen.

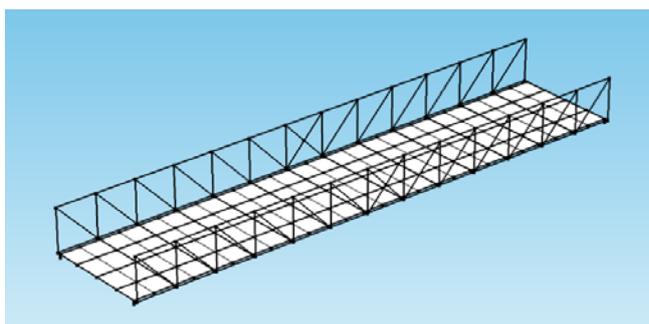


Abbildung 6: Finite-Element-Modell

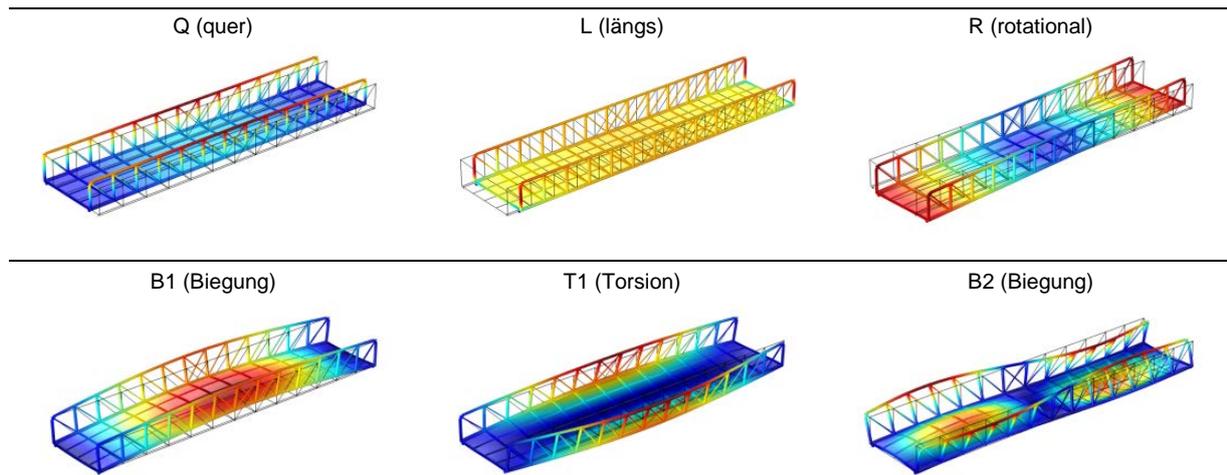


Abbildung 7: Eigenformen

Die Anregung und die Messung der Beschleunigungen erfolgte ähnlich wie beim ersten Beispiel. Ein Vergleich mit gemessenen Eigenfrequenzen ist in Tabelle 4 zusammengestellt. Während die Grundfrequenz (B1) vom Modell gut wiedergegeben wird, ist die Abweichung bei der Torsion (T1) doch beträchtlich. Die Abweichung bei der zweiten Biegeform (B2) ist hingegen wieder eher akzeptabel, da die Differenzen bei höheren Eigenformen erfahrungsgemäss zunehmen.

Die Frage bleibt, warum die Torsion vom FE-Modell relativ schlecht erfasst wird. Ein erster Verdacht betrifft die Modellierung mit dem exzentrischen Anschluss der Platten. Daher wurden zunächst weitere Modelle mit detaillierter Geometrie erstellt. Diese ergaben aber im Wesentlichen die gleichen Resultate wie das erste Modell mit Balken und Platten.

Im Verlaufe der Berechnungen wurde beobachtet, dass die horizontale Steifigkeit der Lager einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Torsionsschwingung hat, während die Biegeschwingungen weitgehend unbeeinflusst bleiben. Daher wurde dieser Einfluss systematisch untersucht. In Abbildung 8a) sind die Eigenfrequenzen in Funktion der horizontalen Lagersteifigkeit gezeichnet. Am meisten beeinflusst werden die Starrkörperformen. Diese kommen bei höheren Steifigkeiten zwischen die andern Formen zu liegen und führen zu gekoppelten Schwingungsformen. Die Eigenfrequenzen der Biegeformen bleiben weitgehend unverändert, während jene der Torsion von der horizontalen Lagersteifigkeit wesentlich beeinflusst wird. Wenn man von einer gemessenen Torsionsfrequenz von 9.36 Hz ausgeht, müsste die horizontale Lagersteifigkeit rund 12 kN/mm betragen, ein Wert, der ungefähr 10-mal höher ist als die Angaben des Herstellers. Der Einfluss der vertikalen Lagersteifigkeit ist relativ gering wie aus Abbildung 8b) ersichtlich ist. Ab einer vertikalen Lagersteifigkeit von etwa 50 kN/mm sind die Eigenfrequenzen praktisch konstant. Verwendet wurde eine Steifigkeit von 100 kN/mm.

**Tabelle 4: Vergleich der gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen [Hz] für eine horizontale Lagersteifigkeit von 1 kN/mm**

Eigenschwingung	Gemessen	Modell	Abweichung
B1	6.03	6.08	0.8 %
T1	9.36	8.83	5.7 %
B2	11.14	11.45	2.8 %

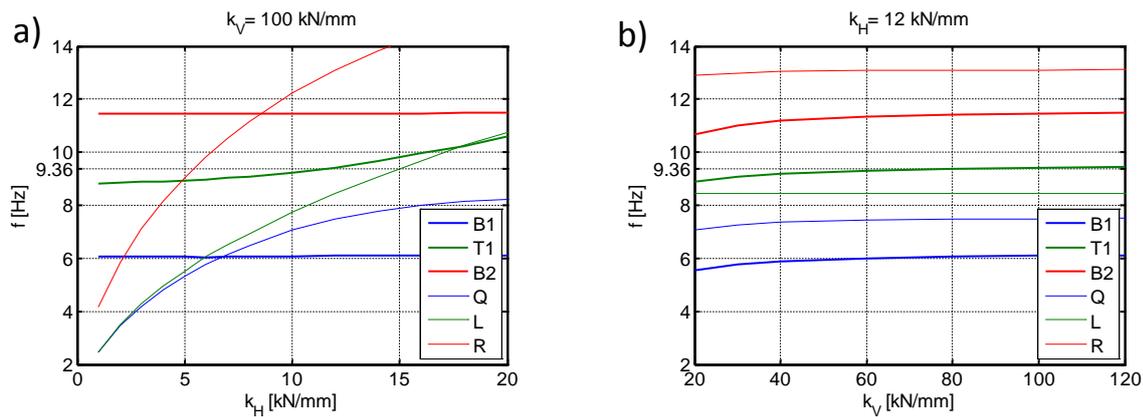


Abbildung 8: a) Einfluss der horizontalen Lagersteifigkeit, b) Einfluss der vertikalen Lagersteifigkeit

Tabelle 5: Vergleich der gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen [Hz] für eine horizontale Lagersteifigkeit von 12 kN/mm

Eigenschwingung	Gemessen	Modell	Abweichung
B1	6.03	6.09	1.0 %
T1	9.36	9.43	0.7 %
B2	11.14	11.46	2.9 %

Tabelle 5 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen und mit einem kalibrierten Modell berechneten Eigenfrequenzen. Die Torsionsschwingung zeigt nun eine wesentlich kleinere Diskrepanz als vorher.

Die Frage bleibt, warum der identifizierte Wert so viel grösser ist als die vom Hersteller angegebene Steifigkeit. Eine Nachfrage beim Hersteller ergab, dass die Werte im Katalog nicht etwa gemessen, sondern nach DIN 1337-3 berechnet wurden. Die Steifigkeit dient dazu, die horizontale Kraft infolge grosser Temperaturexpansionen abzuschätzen, die von den Lagern aufgenommen werden muss. Bei Schwingungen sind die Verschiebungen viel kleiner und die Lager entsprechend steifer. Eine weitere Erhöhung der Steifigkeit ergibt sich aus der dynamischen Belastung.

Um ein besseres Bild zu bekommen, wurde die Brücke horizontal angeregt und die Starrkörperformen identifiziert. Zu diesem Zweck musste der Shaker für eine horizontale Anregung umgebaut werden, wie in Abbildung 9a) gezeigt. Die Anregung erfolgte in verschiedenen Positionen und Richtungen (Abbildung 9b). Bei diesen Tests war der Asphaltbelag bereits aufgebracht. Da der Asphalt bei diesen Schwingungsformen kaum mitwirkt ausser durch seine Masse, wurde die Temperaturabhängigkeit des Asphalts nicht berücksichtigt. Andererseits wurde vermutet, dass die Lagertemperatur einen Einfluss haben könnte, weshalb diese aufgezeichnet wurde. Ebenfalls gemessen wurde die Temperatur der Stahlplatte.

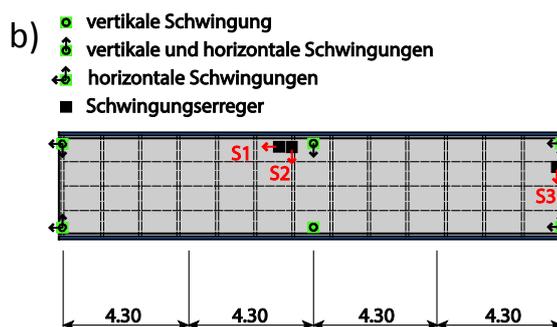
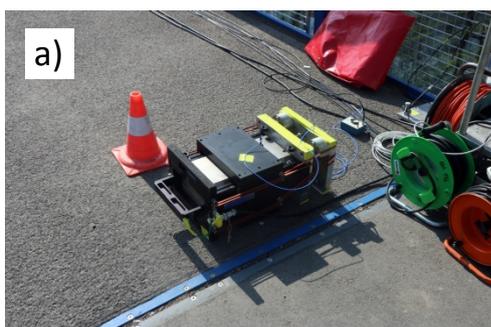


Abbildung 9: a) Shaker umgebaut für horizontale Anregung in Querrichtung, b) Positionen des Shakers und der Sensoren

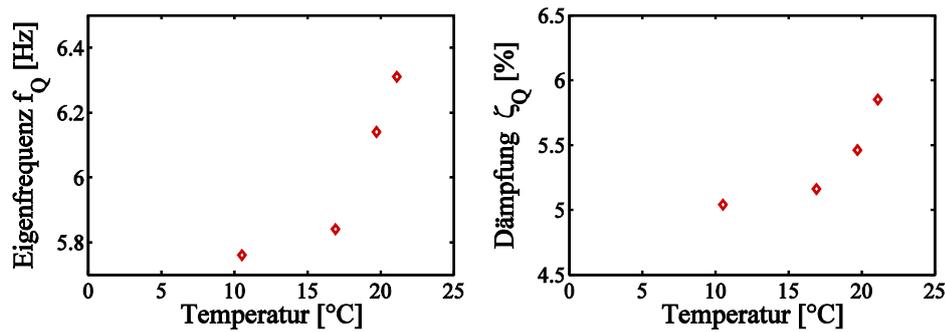


Abbildung 10: Eigenfrequenz und Dämpfung der horizontalen Querschwingung in Abhängigkeit der Temperatur der Brückenplatte.

Die Eigenfrequenz und die Dämpfung der horizontalen Querschwingung sind in Abbildung 10 aufgetragen. Bei einer Temperatur der Brückenplatte von 20°C steigen beide Werte sprunghaft an. Dieser Anstieg kann wie folgt gedeutet werden: Es wird vermutet, dass die Temperaturoausdehnung dazu führt, dass der Elastomer im Fahrbahnübergang (nicht die Lager selber) zusammengedrückt und dadurch die Steifigkeit erhöht wird. Die Erwärmung der Lager allein würde eher zu einer Verkleinerung der Steifigkeit führen, wenn man den Elastomer als viskoses Material betrachtet. Zudem hat sich die Lagertemperatur während den Messungen nur wenig verändert. Wenn man annimmt, dass die Brücke bei kalter Brückenplatte (unter 20°C) nicht durch die Fahrbahnübergänge behindert wird, sollte eine Kalibration der Lager aus den Eigenfrequenzen der Horizontalformen mit Asphalt zu ähnlichen Steifigkeiten führen wie die Kalibration aus der Anpassung der ersten Torsions-Eigenschwingungen bei der Brücke ohne Asphalt, wo noch keine Fahrbahnübergänge eingebaut waren. Eine horizontale Steifigkeit der Lager von  $k_H=12$  kN/mm im numerischen Modell mit Asphalt führt zu den in Tabelle 6 gezeigten Eigenfrequenzen. Diese sind weitgehend unabhängig von der Asphalttemperatur, wie der Vergleich von zwei Extremtemperaturen zeigt, und stimmen relativ gut mit den gemessenen Werten überein und zwar für alle drei Horizontalformen. Damit bestätigt sich die Vermutung, dass die Herstellerwerte der horizontalen Lagersteifigkeit für den dynamischen Fall nicht zutreffen.

Tabelle 6: Vergleich der gemessenen und berechneten horizontalen Eigenfrequenzen [Hz] bei einer horizontalen Lagersteifigkeit von  $k_H= 12$  N/mm

Asphalttemperatur	T= 0°C	T=50°C	gemessen
Q	6.57	6.30	5.8
L	6.91	6.88	5.8
R	11.41	11.20	10.5

## Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Anhand von zwei Beispielen wurde aufgezeigt, dass auch einfache Bauwerke wie Fussgängerbrücken sich dynamisch anders verhalten können, als zunächst angenommen. Bei beiden Beispielen war es der Einfluss der Lager, der zu einem zunächst rätselhaften Schwingungsverhalten führte. In einem Fall war es die Reibung im Gleitlager, beim andern Fall die Steifigkeit des Elastomer-Lagers.

## Referenz

[1] Einfluss des Asphaltbelages auf die Dynamik von Fussgängerbrücken aus Beton und Stahl, ASTRA Bericht AGB-2010-006, 2015.