

# Lock-in-Effekt bei Brücken infolge Fußgängeranregung – Schwingungstest der weltlängsten Fußgänger- und Velobrücke „Dreiländerbrücke“

Michael Mistler & Dieter Heiland  
*Ingenieurbüro Dr. Heiland*  
*Sachverständigenbüro für Baudynamik*  
Bergstraße 174  
D-44807 Bochum  
[www.baudynamik.de](http://www.baudynamik.de)

**ZUSAMMENFASSUNG:** Die Dreiländerbrücke, eine Fußgänger- und Fahrradbrücke über den Rhein, wurde rechnerisch als sehr schwingungsanfällig in Bezug auf Fußgängeranregung eingeschätzt. Deshalb wurden Testmessungen unter Einbeziehung von mehr als 800 Personen durchgeführt. Der Lock-in-Effekt konnte wiederholt nachgewiesen werden.

## 1 EINLEITUNG

Die im November 2006 über dem Rhein montierte Bogenbrücke mit dem Namen „Dreiländerbrücke“ verbindet die Stadt Weil am Rhein auf deutscher Seite mit der elsässischen Stadt Hüningen auf französischer Seite (Abbildung 1).

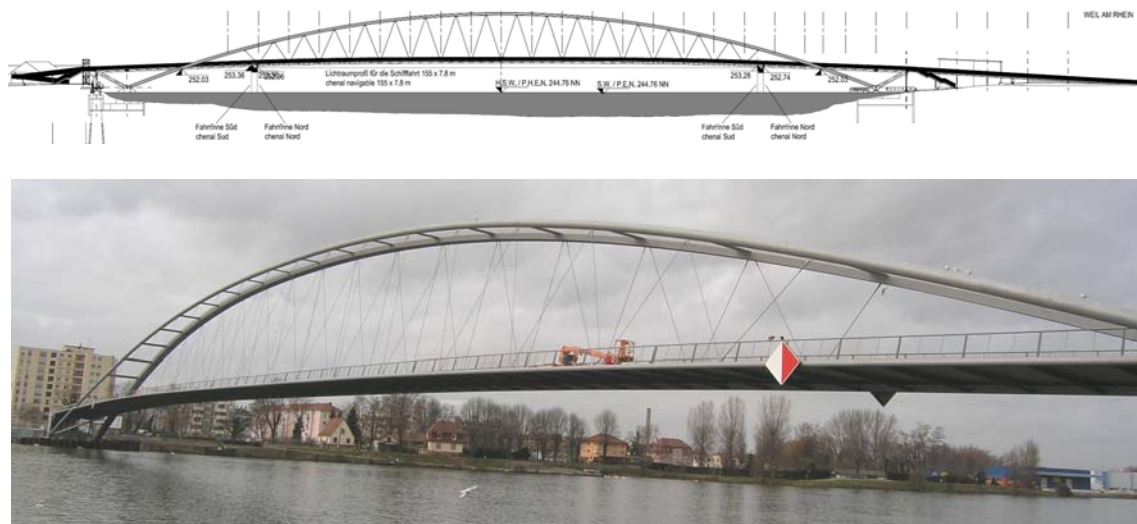


Abbildung 1: Längsschnitt und -ansicht der Dreiländerbrücke über den Rhein



Abbildung 2: Ansichten der Brücke entlang des Fußgängerstegs

Sie wurde im Auftrag der Stadt Weil am Rhein und der Dreiländer-Eck-Gemeinschaft („Communauté de Communes des Trois Frontières“) von dem Architekten Feichtinger Architectes (Paris) entworfen und mit dem Ingenieurbüro Leonhardt, Andrä und Partner (LAP, Berlin) geplant.

Die Stahlbrücke mit einer freien Bogenspannweite von 229,4 Metern hat auf der Nordseite einen vertikal stehenden Bogen mit einem Stich von 23 m ( $L/10$ ) als Haupttragelement, bestehend aus zwei sechseckigen Rohren. Daran angelehnt erstreckt sich auf der Südseite ein zweiter, geneigter Bogen mit einteiligem Querschnitt. Der gesamte Brückenquerschnitt ist somit asymmetrisch. Die Auflager des Bogens befinden sich im Uferbereich, wodurch das Flussbett weitgehend ungestört bleibt. Die gesamte Hauptbrücke wurde vormontiert und anschließend eingeschwommen.

Die mit dem geringen Bogenstich einhergehende Weichheit der Konstruktion machte das Bauwerk zu einer technischen Herausforderung, nicht nur in statischer Hinsicht, sondern gerade auch im Hinblick auf das dynamische Schwingungsverhalten infolge personeninduzierter Anregung. Erste Berechnungen ergaben, dass im Bereich von 0,6 bis 1,0 Hz drei laterale Eigenformen vorliegen, die das ganze Bauwerk schwingungsanfällig infolge horizontaler Fußgängeranregung machen. Aus diesem Grund wurde nach Fertigstellung der Konstruktion eine schwingungstechnische Untersuchung der Dreiländerbrücke durchgeführt.

## 2 LOCK-IN-EFFEKT BEI HORIZONTALER FUßGÄNGERANREGUNG

### 2.1 DYNAMISCHE BELASTUNG EINER EINZELPERSON

Neben der Windbelastung wirken auf Fuß- und Radwegbrücken als maßgebende dynamische Anregungen vor allem das Gehen und Laufen von Fußgängern sowie mutwilliges Anregen durch Personengruppen. Unbedeutend sind dagegen die Einwirkungen von Radfahrern. Beim Gehen treten durch die rhythmische Körperbewegung vertikale und horizontale Kräfte auf. Die Anregungsfrequenz in vertikaler Richtung liegt im Bereich von 1,4 bis 2,4 Hz, im Mittel liegt sie bei 2,0 Hz.

	insgesamt	langsam	normal	rasch
Gehen	1,4 – 2,4	1,4 – 1,7	1,7 – 2,2	2,2 – 2,4
Laufen	1,9 – 3,3	1,9 – 2,2	2,2 – 2,7	2,7 – 3,3

Tabelle 1: Vertikale Schrittfrequenzen in [Hz] (Baumann et al., 1988)

Gehen und Laufen unterscheiden sich dadurch, dass beim Laufen der Bodenkontakt unterbrochen ist, hingegen ist beim Gehen der Kraftverlauf, der von der gehenden Person auf den Boden aufgebracht wird, kontinuierlich. Er lässt sich am einfachsten

durch die Summe seiner ersten drei harmonischen Anteile beschreiben. Für die vertikale Richtung lautet die Fourierzerlegung:

$$F_p(t) = G \left[ 1,0 + \sum_{n=1}^3 \alpha_n \cdot \sin((2\pi \cdot n \cdot f_e(t - \phi_n))) \right] \quad (1)$$

mit: $G$	Gewichtskraft der Person
$\alpha_n$	Fourierkoeffizienten der n-ten Harmonischen
$f_e$	Schrittfrequenz
$\phi_n$	Phasenverschiebung der n-ten Harmonischen gegenüber der 1. Harmonischen

In horizontaler Richtung übt eine gehende Person sowohl in Längs- als auch in Querrichtung ebenfalls Kräfte auf den Boden aus, die auf das Pendeln des Massenschwerpunktes zurückzuführen sind. Die Anregungsfrequenz ist demzufolge genau halb so groß wie in vertikale Richtung und liegt im Bereich von 0,7 bis 1,2 Hz (Tabelle 1). Quer zur Fortbewegungsrichtung treten dabei Verschiebungsamplituden des Massenschwerpunktes von etwa 1 – 2 cm auf (Bachmann, 2003). Dies entspricht bei einer Frequenz von  $f_e = 1,0$  Hz im Durchschnitt etwa 0,05 kN als dynamische Anregungskraft einer Einzelperson bei einer Gewichtskraft von 85 kg, was den Angaben von Kovacs (2006) entspricht. Bei Brücken kommt hinzu, dass die Auslenkung des Oberkörpers abhängig von der Bodenbewegung ist, so dass die dynamische Kraft einer Person auch größere Werte annehmen kann, aber dennoch relativ klein im Bezug zu den Vertikalkräften ist.

## 2.2 SYNCHRONISATIONSEFFEKT DER HORIZONTALKOMPONENTE BEI EINER PERSONENGRUPPE

Die Vertikalkomponente der Fußgängeranregung nimmt mit steigender Personenanzahl zu, da sie nur eine einzige Wirkungsrichtung besitzt. Im Gegensatz dazu muss die Horizontalkomponente nicht unbedingt mit steigender Personenanzahl automatisch anwachsen. Die rein zufällig verteilten horizontalen Einwirkungen der Fußgänger in zwei Richtungen werden sich in der Zeit zwar teilweise überlagern, aber auch kompensieren, so dass statistisch über die Zeit gemittelt sich die Kräfte der Personen gegenseitig aufheben. Selbst wenn der Takt vorgegeben wird, kann synchrones Gehen von einer größeren Personengruppe nur schwer erreicht werden. Ein mutwilliges Aufschaukeln in horizontaler Richtung ist ebenfalls schwer bzw. nur mit wenigen Personen möglich.

Die genannten Zusammenhänge gelten für einen unbeweglichen bzw. sich nahezu in Ruhe befindenden Untergrund. Erfährt der Untergrund jedoch größere Bewegungen, so kann es zu einer Interaktion (Rückkopplungseffekt) zwischen Fußgänger und Bauwerk kommen, da ein Fußgänger sich beim Gehen und Laufen den Bewegungen eines vertikal oder horizontal schwingenden Untergrundes automatisch anpasst. Eine Synchronisation des einzelnen Fußgängers an die Bodenbewegung erfolgt, sobald ein bestimmter Schwellenwert der Schwingamplitude überschritten ist, bei dem kein unbeeinflusstes Gehen mehr möglich ist. Dieser Schwellenwert hängt natürlich von der Konstitution der betreffenden Person sowie der Einwirkungsrichtung ab. Bei der hier betrachteten Horizontalrichtung beginnt die „Anpassung“ nach Bachmann (2003) bereits bei Amplituden von 2-3mm, Kovacs (2006) geht bis zu einer Beschleunigung von 0,1 bis 0,15 m/s<sup>2</sup> von keiner Rückkopplung aus, bei 0,3 m/s<sup>2</sup> ist jedoch mit einer „Anpassung“ von mind. 30 % der Fußgänger zu rechnen. Dies bezieht sich nicht nur auf

die Schrittfrequenzanpassung, sondern ebenfalls auf die Phasen-Lage, also eine kurzfristige Umstellung des Bewegungsablaufs, um sich den Brückenschwingungen „optimal“ anzupassen. Folgendes vereinfachtes Modell soll dies verdeutlichen:

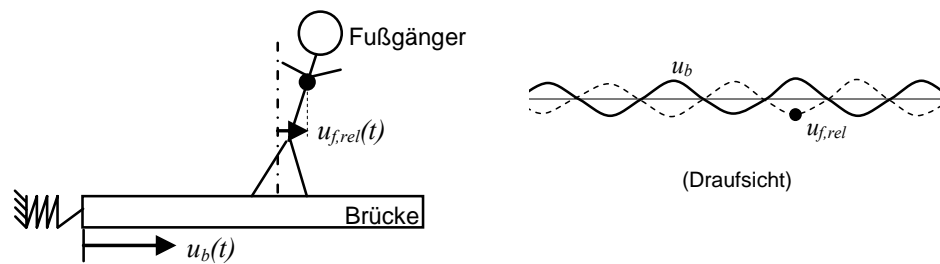


Abbildung 3: Vereinfachtes Fußgänger-Brücken-Modell

Die Brücke als Untergrund des Fußgängers weist eine, im ersten Schritt, vom Fußgänger unabhängige Schwingung der Form

$$u_b(t) = U_b \sin(\Omega t) \quad (2)$$

auf. Der Fußgänger, als Punktmasse idealisiert, bewegt sich relativ zum Untergrund gemäß:

$$u_{f,rel}(t) = U_f \sin(\omega_e t + \varphi) \quad (3)$$

$\omega_e$  ist die Kreisschrittfrequenz und  $\varphi$  der Phasenwinkel, bezogen auf  $u_b$ . Die absolute Bewegung des Fußgängerschwerpunkts ist:

$$u_{f,abs}(t) = u_{f,rel}(t) + u_b(t) = U_b \sin(\Omega t) + U_f \sin(\omega_e t + \varphi) \quad (4)$$

Geht der Passant mit einer Schrittfrequenz  $\omega_e$ , die in etwa der Brückenfrequenz  $\Omega$  entspricht, aber nicht exakt, so ergeben sich „Schwebungen“, und die Amplituden würden über die Zeit mal sehr groß und mal sehr klein werden. Folglich passt der Passant seine Schrittfrequenz automatisch der Brückenschwingung an, um damit seinen Gang zu stabilisieren. Hinzu kommt dann noch die Phasen Anpassung: Für  $\Omega = \omega_e$  bewirkt ein Phasenversatz  $\varphi$  von  $180^\circ$  gerade ein Minimum der Schwerpunktsbeschleunigung, so dass jeder, der sich der Brückenschwingung anpasst, ebenfalls synchron geht. Einerseits bedeutet dies, dass der Schritt genau in Bewegungsrichtung der Brücke und somit eine Verstärkung der Brückenbewegung erfolgt. Die Anregungskraft auf die Brücke durch den Fußgänger wird somit stärker, je größer die Brückenbewegung ist. Andererseits (und dieser Effekt spielt eine wesentlich größere Rolle) nimmt die Zahl der synchronisierten Menschen mit dem Schwingungspegel immer mehr zu. Das Kritische dieses „Lock-in-Effektes“ besteht also darin, dass er eine automatische Synchronisation der Fußgänger und damit zu einer überproportionalen Verstärkung der horizontalen Brückenschwingungen führt, was wiederum zu einer Verstärkung der Synchronisation führt. Dieser Ursache-Wirkungs-Kreislauf verstärkt sich innerhalb Sekunden immer mehr und führt schließlich zu einem Schwingungszustand der Brücke, bei dem normales Gehen nicht mehr möglich ist oder sogar Unsicherheitsgefühle und Panikreaktionen bei den Fußgängern weckt. Dieser Sonderfall ist in der Literatur bei leichten Fußgängerbauwerken mit hohem Verkehrsaufkommen zwar bekannt und wird als kritisches dynamisches Verhalten einer Brücke betrachtet, in der Praxis ist dem aber bisher zu wenig Beachtung geschenkt worden. Beispiele hierzu sind neben den im späteren Abschnitt beschriebenen Versuchen an der Dreiländerbrücke u. a. folgende Fälle:

- die Millenium-Bridge in London(Dallard et al., 2001)
- Fußgängerbrücke beim Flughafen von Genf (Bachmann, 2003)
- Glacis-Brücke in Minden (Kovacs, 2006)

Wie bereits erwähnt erfolgt der Übergang vom unkritischen in den kritischen Zustand ab Beschleunigungen von etwa  $0,3 \text{ m/s}^2$ , das auslösende Beschleunigungsniveau kann aber größer oder kleiner sein, abhängig von der Empfindlichkeit der betreffenden Personen und je nachdem, ob die Brückenschwingungen stabil oder instabil ist. Bei stabilen, stationären Schwingungen kann sogar bei einem noch deutlich unter dieser Marke liegenden Beschleunigungsniveau der kritische Zustand ausgelöst werden, da die Menschen sich schneller dem Rhythmus und Phase der Schritte anpassen können.

### 3 SCHWINGUNGSTEST DER DREILÄNDERBRÜCKE

#### 3.1 ZIELSETZUNG

Bei der Dreiländerbrücke über den Rhein ergaben Berechnungen, dass neben den ersten beiden Eigenfrequenzen der Brücke bei ca. 0,5 Hz bis 0,6 Hz drei Eigenformen im Frequenzbereich von ca. 0,8 Hz bis, 0,9 Hz liegen, die eine starke horizontale Schwingungskomponente des Decks aufweisen. Somit kam der Verdacht auf, dass eine leichte Anregbarkeit der Brücke durch Personen besteht und bei größeren Menschenmengen der Lock-in-Effekt eventuell auftreten könnte. Ein Vergleich mit der Millenium-Bridge ergab (Kovacs, 2006), dass bereits weniger als die Hälfte der kritischen Personendichte bei der Dreiländerbrücke ausreichen würde, um unzulässig große Beschleunigungen hervorzurufen.

Da die Brücke mittlerweile bereits fertiggestellt war und ein großes öffentliches Einweihungsfest geplant war, sollten die Voruntersuchungen durch messtechnische Versuche validiert werden. Ziel der Messung war es,

1. die maßgebenden Eigenfrequenzen zu analysieren, die als kritisch hinsichtlich Fußgängeranregung zu betrachten sind,
2. die zugehörige Modalform messtechnisch zu identifizieren,
3. die Möglichkeit einer Selbstanregung der Brückenschwingung infolge von Fußgängern zu überprüfen und damit die Auswirkung der Autosynchronisation der Fußgängern messtechnisch zu erfassen („Lock-in“-Effekt).
4. Zusätzlich sollten durch Eigenfrequenzmessungen die Seilkräfte aller Hänger bestimmt werden.

Um dieser Zielsetzung gerecht zu werden,

- war eine räumliche Erfassung der Brückenschwingung nötig (synchrone Erfassung der Zeitverläufe sowohl auf dem Deck als auch auf dem Bogen der Brücke),
- wurden die Brückenschwingung bei ambienter Anregung über einen längeren Zeitraum (30 min) gemessen, so dass die Auflösung im Frequenzbereich groß genug ist, um die eng zusammenliegenden Eigenfrequenzen unterscheiden zu können,
- wurden Tests mit einer größeren Anzahl von Fußgängern durchgeführt.

#### 3.2 EXPERIMENTELLE MODALFORMIDENTIFIKATION

Für die messtechnische Untersuchung wurden robuste Geschwindigkeitsaufnehmer nach DIN 45669 (Geophone) eingesetzt, die selbst kleinste Schwingungsamplituden im Bereich  $< 1$  Mikrometer aufzeichnen können und für den Frequenzbereich 0,5 – 315 Hz kalibriert wurden. Zusätzlich wurde in Brückenmitte ein Beschleunigungsaufnehmer (0,1 Hz High-Pass-Filter, 5000 mV/g) in horizontaler Richtung installiert.

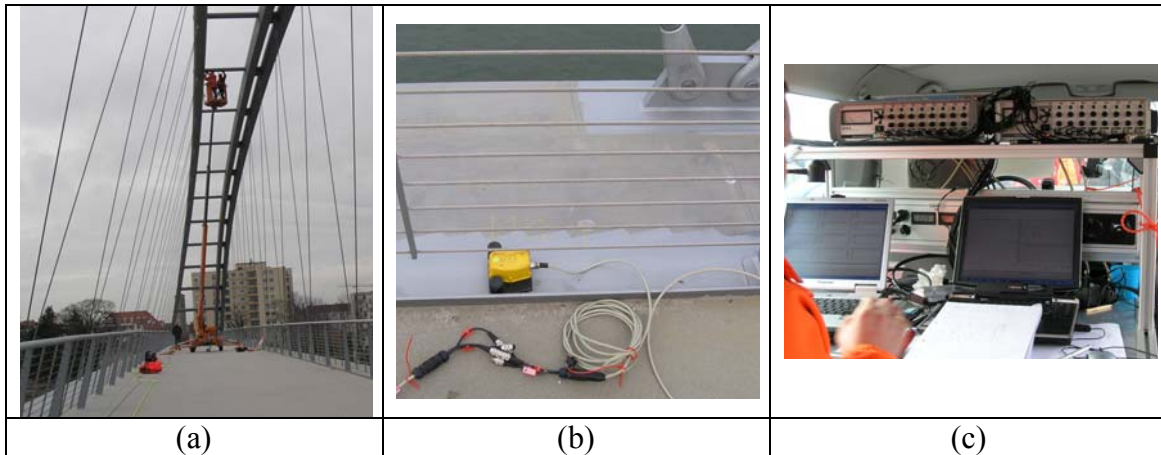


Abbildung 4: Montage der Schwingungsaufnehmer auf dem Bogen, eingesetzte Geophone und Messequipment

Insgesamt wurden 12 Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer gleichzeitig eingesetzt. Die Anordnung erfolgte in drei Messquerschnitten (MQ1, MQ2, MQ3): In jedem Messquerschnitt wurde ein horizontaler Aufnehmer auf dem Bogen installiert zur Messung der lateralen Schwingungen und drei Aufnehmer auf dem Deck. Auf dem Deck wurden auf beiden Seiten die vertikalen Schwingungen gemessen, so dass die Torsion mit erfasst werden konnte, und es wurde ebenfalls die horizontale Schwingung in jedem Messquerschnitt gemessen. In Abbildung 5 ist die Lage aller Messpunkte skizziert. Zusätzlich zu den Schwinggeschwindigkeitsaufnehmern wurde in Brückenmitte ein horizontaler Beschleunigungsaufnehmer installiert.

Um die Schwingungsform des Decks genauer zu identifizieren, wurden außerdem bei einer Langzeitmessung unter ambienter Anregung die Messaufnehmer versetzt angeordnet, so dass die Identifizierung der Eigenform anhand von 20 Stützstellen approximiert werden konnte. Insgesamt wurden Kabel von ca. 1200 m Länge verlegt.

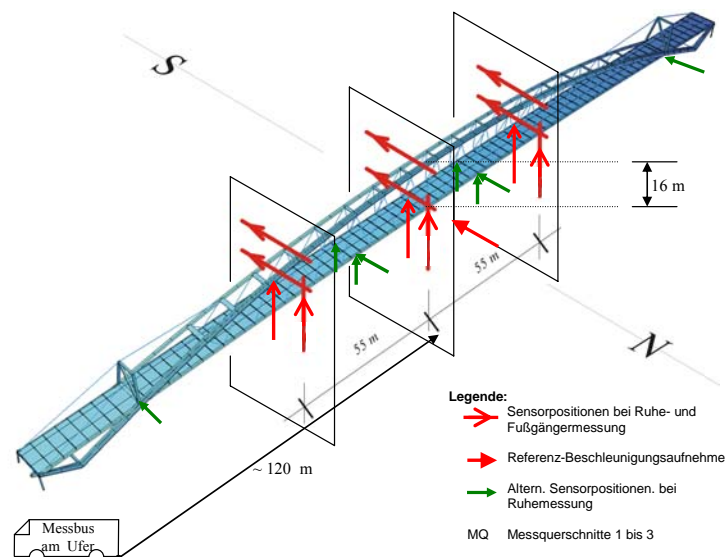


Abbildung 5: Skizze der Messaufnehmerpositionen

Aus den Vorberechnungen (Abschnitt 3) war bekannt, dass die Frequenzunterschiede minimal sein können. Um eine ausreichende Auflösung im Frequenzbereich zu bekommen, wurden Langzeitmessungen von 30 min mit einer Bandbreite von 400 Hz durchgeführt. Die Eigenfrequenzen bis 2 Hz sind in Tabelle 2 aufgelistet. Der Einfluss

der Fußgänger auf die Modalform ist vernachlässigbar. Im Bereich der halben Schrittfrequenz (1 Hz) wurden, wie erwartet, drei Eigenfrequenzen mit sehr kleinen Frequenzunterschieden (teilweise kleiner als 0,1 Hz) nachgewiesen, die sowohl horizontale als auch vertikale Schwingungskomponenten enthalten.

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ohne Verkehrslast (max. 5 Pers.)	0,53	0,70	0,90	0,95	1,00	1,38	1,47	1,65	1,94	2,19	2,27
mit Verkehrslast (> 800 Pers.)	0,53	0,68	0,90	0,93	0,98	1,37	1,43	1,62	1,90	2,18	2,25

Tabelle 2: Gemessene Eigenfrequenzen [Hz] der Dreiländerbrücke

Die gemessenen Modalformen konnten sowohl quantitativ anhand der Frequenz als auch qualitativ anhand der Form den rechnerisch ermittelten Modalformen zugeordnet werden. Zu beachten ist dabei, dass bei der messtechnischen Untersuchung nur die horizontale Querbewegung des Bogens gemessen wurde. Außerdem ist bei der zeichnerischen Darstellung zwischen den Stellen der Messpunkte linear interpoliert worden.

Zum Beispiel ist die erste Eigenform ( $f = 0,53$  Hz) charakterisiert durch eine nahezu symmetrische Verformungsfigur sowohl des Bogens als auch des Decks. Durch das „Bogenkippen“ wird ebenfalls das Deck in Brückenmitte verdreht (Abbildung 6).

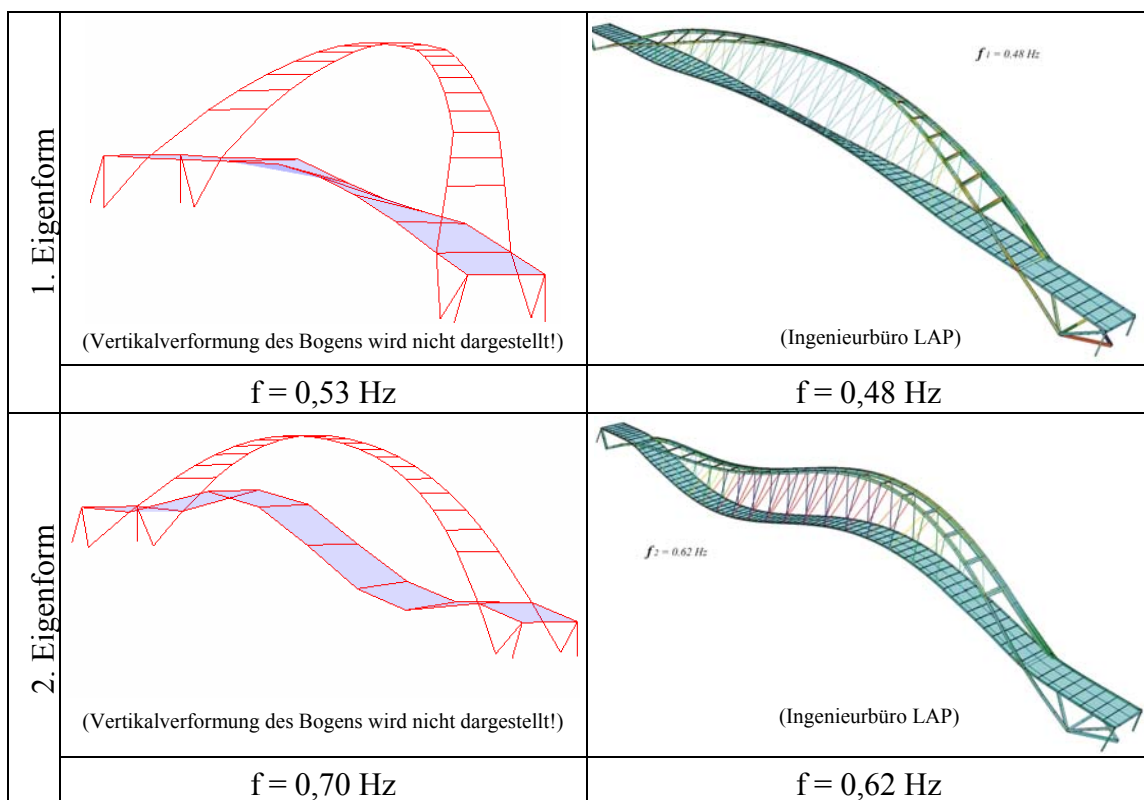


Abbildung 6: 1. und 2. gemessene und berechnete Eigenform (Ingenieurbüro LAP)

Die zweite gemessene Eigenform ist hauptsächlich eine Vertikalschwingung. Das Deck verformt sich in der Ansicht asymmetrisch. Da nur horizontale Aufnehmer auf dem Bogen installiert waren, werden bei dieser Eigenform (fast) keine Bogenverformungen gemessen. Zuzuordnen ist diese Eigenform der zweiten berechneten Modalform

In Abbildung 7 sind die dritte, vierte und fünfte messtechnisch ermittelten Eigenformen dargestellt. Bei der fünften Eigenform macht das Deck symmetrische Bewegung, und der Bogen verhält sich ebenfalls nahezu symmetrisch, nur dass infolge der unterschiedlichen Auflagerbedingungen eine kleine Asymmetrie hervorgerufen wird. In der Draufsicht machen beide Strukturen eine gegenläufige Bewegung. Sie kann der dritten berechneten Eigenform zugeordnet werden.

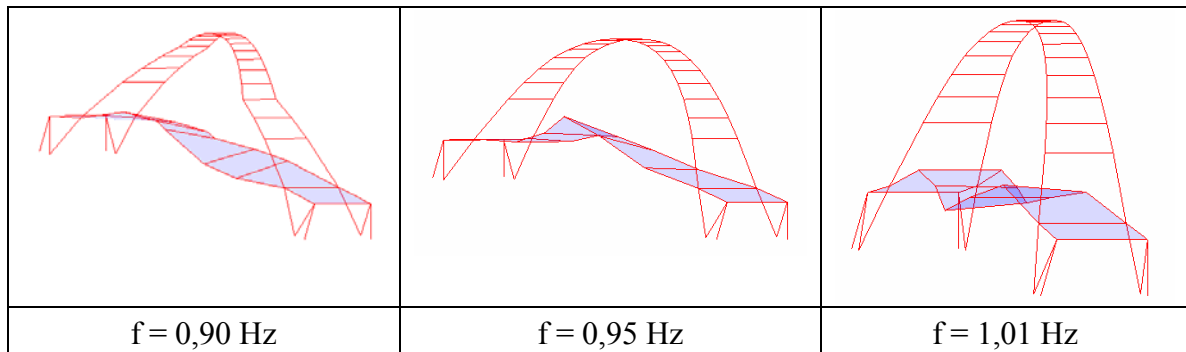


Abbildung 7: Messtechnisch ermittelte Eigenformen

#### 4 FUßGÄNGERTESTS

Zunächst wurde mutwilliges Anregen der Brücke in vertikale und horizontale Richtung mit einer Gruppe von 14 Personen simuliert. Die Taktvorgabe erfolgte durch ein Metronom. Eine maximale Beschleunigung von  $0,5 \text{ m/s}^2$  wurde zwar in horizontaler Richtung gerade erreicht, ein richtiges Aufschaukeln der Brücke war aber nicht möglich.



Abbildung 8: Mutwilliges Anregen weniger Personen, Fußgängertests mit Beteiligung von mehr als 800 Testpersonen

Im Anschluss daran fanden fünf Schwingungsversuche unter Beteiligung von mehr als 800 freiwilligen Testpersonen statt. Es wurde ein gleichmäßiger „Fußgängerstrom“ über die Brücke simuliert, indem nur eine Gehrichtung erlaubt war, es wurde aber bewusst kein Takt vorgegeben, so dass „normales“ Gehen mit unterschiedlichen Schrittfolgen möglich war.

In den ersten beiden Versuchen wurde die Brücke auf max.  $0,19$  bzw.  $0,45 \text{ m/s}^2$  beschleunigt. Es kam bei diesen Tests zu keinem nennenswerten „Aufschaukeln“ der Brücke. Zurückzuführen ist dies darauf, dass viele Beteiligte den Gehversuch als Gelegenheit zum Fotografieren nutzten und deshalb der Fußgängerstrom eine sehr



niedrige Geschwindigkeit aufwies und teilweise zum Stocken kam. Deshalb wurden die Fußgänger aufgefordert, mit einer normalen bis zügigen Gehgeschwindigkeit die Brücke in den folgenden Tests zu überqueren.

Bei der darauf folgenden Messung kam es zu größeren Querschleunigungen. Ab einem Wert von 0,2 bis 0,4  $m/s^2$  haben sich die ersten Fußgänger mit den Brückenschwingungen synchronisiert, so dass ab dann die Beschleunigungswerte überproportional anstiegen, was wiederum zu einer größeren Synchronisation der Fußgänger führte.



Abbildung 9: (aus Filmsequenzen entnommen) (a) Synchronisation der Fußgänger beim Aufschaukeln der Brücke und (b) Verhalten der älteren Versuchsteilnehmer

Die Versuche mussten abrupt abgebrochen werden, und die Fußgänger wurden per Megaphone zum sofortigen Stehenbleiben aufgefordert, als die Beschleunigung den Grenzwert von ca. 1,0 bis 1,2  $m/s^2$  überschritt. Sie erreichten trotzdem noch eine max. Beschleunigung von 1,4 bzw. 1,7  $m/s^2$ . Dies entspricht einer maximalen Peak-to-Peak-Amplitude von ca. 8 cm. Im aufgeschaukelten Zustand konnte folgendes festgestellt werden:

- Normales Gehen war bei einem horizontalen Beschleunigungsniveau ab 1,0  $m/s^2$  nicht mehr möglich, sondern nur noch schwankend und breitbeinig
- Gegenseitiges Festhalten der beteiligten Personen
- Stehenbleiben und Festhalten am Brückengeländer
- Der eingeschwingene Zustand entsprach der 5. Modalform. Die zugehörige Frequenz liegt bei 0,96 Hz und ist damit geringfügig kleiner als die 5. Eigenfrequenz, die unter Verkehrslast gemessen wurde.
- Das Ausschwingen der Brücke dauerte ca. eine Minute, was auf eine sehr niedrige Dämpfung des Tragwerks zurückzuführen ist. Bei kleinen Auslenkungen ist  $D < 0,01$ .

Der beschriebene Effekt konnte in einem weiteren Versuch nochmals wiederholt werden. Aus Sicherheitsgründen wurde auch der zweite Versuch bei Erreichen einer Beschleunigung von 1,2  $m/s^2$  abgebrochen und die Fußgänger zum sofortigen Stehenbleiben aufgefordert.

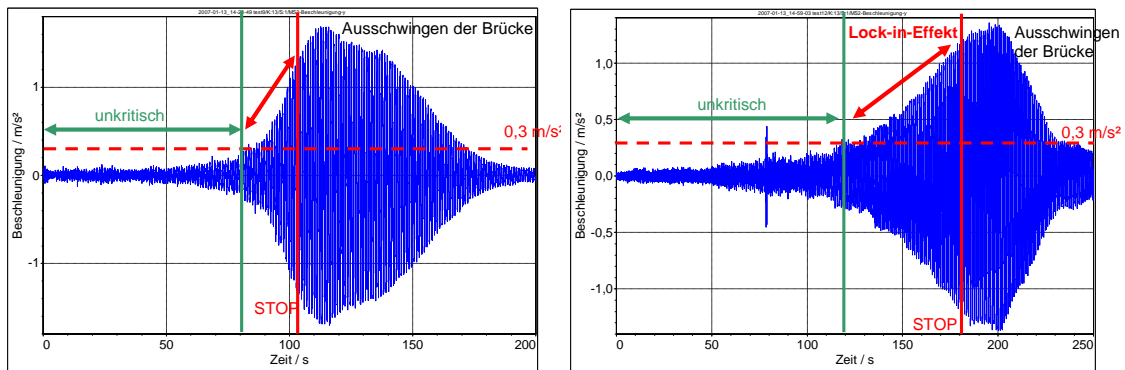


Abbildung 10: Gemessene horizontale Beschleunigungszeitverläufe beim Überqueren der Brücke und sofortigem Stillstand aller Beteiligten

Der Lock-in-Effekt wurde somit bei den Schwingungsmessungen der Dreiländerbrücke nachgewiesen. Er führte nach Befragung der Versuchsteilnehmer zu einem Unsicherheitsgefühl, obwohl sie vorgewarnt waren. In der „Realität“ könnten vergleichbare Beschleunigungswerte bei nicht vorgewarnten Personen panikartige Reaktionen auslösen, so dass eine solche Situation als Gefahr für die Fußgänger zu bewerten ist. Deshalb wurde in einem weiteren Auswerteschritt die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse geprüft, um in Zukunft Gefahrensituationen ausschließen zu können. Anhand verschiedener Nutzungs-Szenarien wurde überprüft, ob dies nur durch bauliche (Schwingungstilger) oder auch Maßnahmen organisatorischer Art möglich ist.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Schwingungsversuch an der Dreiländerbrücke ist ein Paradebeispiel für den messtechnischen Nachweis des Lock-in-Effektes infolge horizontaler Fußgängeranregung. Die Besonderheit dieser Brücke liegt in seiner Eigenfrequenz von 1,0 Hz. Die Eigenform hat neben der horizontalen Komponente ebenfalls eine vertikale und lässt sich somit leicht anregen. Wird ein bestimmtes Beschleunigungsniveau erreicht, verstärkt sich die Anregung überproportional durch die Synchronisation der Fußgänger. Der Effekt tritt aber erst bei einer großen Personenanzahl auf. Technisch gesehen wäre der Einbau eines Schwingungstilgers die wirksamste Weise, dem Phänomen entgegenzuwirken.

## SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Bachmann, H., 2003. „Lebendige“ Fußgängerbrücken – eine Herausforderung. D-A-CH- Tagung 2003. Dokumentation SIA D 0198, 2003
- Baumann, K., Bachmann, H., 1988. Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke. Bericht Nr. 7501-3. IBK, ETH Zürich. Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin.
- Dallard, P. et al., 2001. The London Millennium Footbridge. The Structural Engineer, Volume 79/No 22, 2001
- Kovacs, I., 2006. Zwischenbericht zum dynamischen Verhalten des Bauwerks – Fußgängerbrücke Weil am Rhein. Dynamik – Consulting, 2006
- Strobl, W., 2006. Geh- und Radwegbrücke zwischen Weil und Huningue. Ein (weit) spannendes deutsch-französisches Projekt. Stahlbau Nachrichten, 2006