

# Beitrag zur Dynamik von Strassenbrücken unter der Ueberfahrt schwerer Fahrzeuge

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Cantieni, Reto

**Publication date:**

1991

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000617553>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH Nr. 9505

**Beitrag zur Dynamik von Strassenbrücken  
unter der Überfahrt schwerer Fahrzeuge**

**ABHANDLUNG**  
Zur Erlangung des Titels

**Doktor der technischen Wissenschaften**

der  
**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH**

vorgelegt von

**Reto Padruot Cantieni**  
dipl. Ing., ETH Zürich

geboren am 27. Dezember 1945  
von Pignia (GR)

Angenommen auf Antrag von:

**Prof. Dr. Theodor Erismann, Referent**  
**Prof. Dr. Hugo Bachmann, Korreferent**  
**Prof. Dr. Roger Green, Korreferent**

1991

## KURZFASSUNG

Eine Vielzahl dynamischer Belastungsversuche, die von der Abteilung Massivbau der EMPA im Laufe von Jahrzehnten an Strassenbrücken durchgeführt worden waren, hatte zwar zu einigen Erkenntnissen geführt, hatte aber auch das Bedürfnis nach näherer Abklärung offengebliebener Fragen wach werden lassen. Zu diesen Fragen gehörten insbesondere jene nach dem Einfluss der frequenzmässigen Beziehungen zwischen den dynamischen Radlasten und den Eigenfrequenzen der Brücke und jene nach dem Einfluss der Ebenheit des Fahrbelages.

Die Versuche an der Bergspurbrücke Deibüel, über die hier zunächst berichtet wird, waren deshalb daraufhin angelegt, die entsprechenden Parameter messtechnisch zu erfassen und systematisch zu variieren. Durch zweckmässige Auswertung der gemessenen Signale wurden die Grundlagen für eine anschliessende, grundsätzliche Untersuchung des Problems anhand einfacher Modelle geschaffen.

Bei den genannten Versuchen wurden die Unebenheiten der beiden verwendeten Fahrbeläge exakt ausgemessen und an den eingesetzten Versuchsfahrzeugen, vier blattgefederten Zweiachsern, die dynamischen Radlasten gemessen. Die Eigenfrequenzen und -formen der 110 m langen Brücke wurden durch harmonische Anregung bestimmt, ihre Durchbiegung unter der Überfahrt der Fahrzeuge je in der Mitte der drei Felder gemessen. Die Auswertung konzentrierte sich neben einer Analyse im Zeitbereich auf die Untersuchung der gemessenen Signale im Frequenzbereich.

Die Resultate der Versuche an der Deibüel-Brücke können wie folgt zusammengefasst werden:

Das Spektrum der dynamischen Radlasten erstreckt sich über einen Bereich  $f = 1 \dots 5$  Hz und weist immer mehrere Peaks auf. Die dominante Radlastfrequenz liegt zwischen  $f = 1.5$  Hz und  $f = 3.5$  Hz und wird durch die Belageebenheit, die Fahrgeschwindigkeit und die Steifigkeit der Aufbaufeder bestimmt. Von wesentlicher Bedeutung ist dabei der Aktivierungszustand der Aufbaufeder: Ist die Blattfeder blockiert, treten dominante Radlasten im Bereich des oberen, bei aktivierter Blattfeder im Bereich des unteren Grenzwertes auf.

Die Schwingungsform eines Zweiachsers kann irgendwo zwischen einer reinen Hub- und einer reinen Nickschwingung liegen. Für tiefere Geschwindigkeiten treten eher Hub-, für höhere Geschwindigkeiten nur Nickschwingungen auf.

Für das Verhalten der Brücke sind alle im Bereich  $f = 1 \dots 6$  Hz liegenden Eigenschwingungen und die zugehörigen Eigenformen wesentlich. Dies ergibt sich aus dem unten diskutierten Interaktionsverhalten zwischen Fahrzeug und Brücke. Es waren keine Anzeichen dafür zu beobachten, dass die Rückwirkung der Brückenbewegung auf das Verhalten der Fahrzeuge einen wesentlichen Einfluss hat.

Die Belagebenheit ist zwar als einziger Parameter im vorliegenden Problem statistischen Betrachtungsweisen zugänglich. Aufgrund der Relationen zwischen den Spannweiten der Brücke und der grössten massgebenden Wellenlänge der Unebenheiten erwies es sich jedoch als notwendig, das exakte, determinierte Längsprofil des Belages zu berücksichtigen.

Die Frequenzanalyse erwies sich für die Auswertung von Versuchen mit kleinerer Fahrgeschwindigkeit als recht gutes Instrument. Bei Fahrgeschwindigkeiten von mehr als 45 km/h wurde ihr Auflösungsvermögen jedoch zu schlecht, um eine detaillierte Beurteilung der Interaktion zwischen Fahrzeug und Brücke durchführen zu können. Die für kleinere Geschwindigkeiten gewonnenen Ergebnisse genügten aber als Basis für die Beurteilung einiger einfacher Interaktionsmodelle.

Bei der Modellbildung lieferte ein Zweimassenschwinger, zusammengesetzt aus je einem einfachen Schwinger für Fahrzeug und Brücke, erste, gute Ergebnisse bei der Interpretation der recht beträchtlichen Frequenzverschiebungen, die während der Überfahrt des Fahrzeuges sowohl bei den dynamischen Radlasten als auch bei den Brückenreaktionen zu beobachten waren. Modellierung und Interpretation wurden weiter verfeinert, indem die Brücke als kontinuierlicher Rahmen nachgebildet wurde, und die Auswertebereiche für die Frequenzanalyse sich nicht über die ganze Brücke, sondern auf die einzelnen Felder erstreckten.

Es zeigte sich, dass die Interaktion Fahrzeug/Brücke beziehungsweise das Koppelungsverhalten dieser beiden mechanischen Systeme von zentraler Bedeutung für die resultierenden Bewegungen ist. Die Koppelung Fahrzeug/Brücke durchläuft während einer Überfahrt (mehrmals) die Stadien "entkoppelt", wenn sich das Fahrzeug in Auflagernähe befindet, und "eng gekoppelt", wenn sich das Fahrzeug im Bereich einer Feldmitte befindet. Da zudem der Zustand "eng gekoppelt" nicht für alle Brückenfelder gleich ist, ist der Koppelungsgrad Fahrzeug/Brücke während einer Überfahrt beachtlichen, mittels Frequenzanalyse nachweisbaren Schwankungen unterworfen.

Die letztlich interessierende Brückenreaktion setzt sich demnach aus vom Fahrzeug erzwungenen Schwingungen, Schwingungen, die sich aus einer Koppelung der mechanischen Systeme "Fahrzeug" und "Brücke" ergeben, und Eigenschwingungen der Brücke zusammen. Oft treten dabei Schwebungen auf.

Pour le comportement du pont, toutes les fréquences propres situées dans la bande  $f = 1 \dots 6$  Hz avec leurs formes de modes naturels correspondantes sont importantes. Ceci découle des interactions entre les véhicules et le pont qui sont discutées plus loin. Il n'a été décelé aucun signe d'une influence importante de la rétroaction des mouvements du pont sur le comportement des véhicules.

Dans le problème en discussion ici, l'uni du revêtement est le seul paramètre qui peut être traité avec des méthodes statistiques. Toutefois, du fait des relations existant entre la longueur des travées du pont et la longueur d'onde maximale déterminante de l'uni du revêtement, il a été nécessaire de tenir compte du profil longitudinal réel déterminé.

L'analyse des fréquences s'est révélée un instrument fort bien approprié pour l'évaluation des essais effectués avec des véhicules roulant à faible vitesse. Pour les vitesses supérieures à 45 km/h, son pouvoir de résolution devient toutefois trop faible pour permettre une appréciation précise de l'interaction entre les véhicules et le pont. Les résultats obtenus avec des vitesses de roulement basses étaient toutefois suffisants pour permettre une évaluation de modèles d'interaction simples.

Pour la modélisation, un oscillateur à deux masses, constitué d'un oscillateur simple pour le véhicule et pour le pont, a fourni des premiers résultats de bonne qualité pour l'interprétation des décalages importants des fréquences qui se produisent aussi bien pour les charges de roue dynamiques que pour les réactions du pont lors du passage des véhicules. La modélisation et l'interprétation ont encore été affinées en prenant pour modèle du pont un cadre continu et comme domaine d'évaluation pour l'analyse des fréquences non pas le pont dans son ensemble, mais ses différentes travées.

Il apparaît que l'interaction véhicule/pont, respectivement le couplage des deux systèmes mécaniques est d'une importance capitale pour les mouvements résultants. Durant le passage d'un véhicule, le couplage véhicule/pont passe (plusieurs fois) par les stades "découplés", lorsque le véhicule se trouve au voisinage des appuis, et "étroitement couplés" lorsque le véhicule se trouve au milieu d'une travée. De plus, du fait que l'état "étroitement couplé" n'est pas le même pour toutes les travées du pont, le degré de couplage véhicule/pont est soumis à des variations importantes que l'analyse des fréquences met en évidence.

La réaction du pont qui nous intéresse finalement se compose des oscillations forcées causées par le véhicule, des oscillations résultant du couplage des systèmes mécaniques "véhicule" et "pont" et des oscillations propres du pont. Il se produit alors souvent des battements.

## SUMMARY

In the course of the last decades, the EMPA Section Concrete Structures has carried out a large number of dynamic loading tests on highway bridges. Although these tests furthered the state of knowledge, they also raised questions requiring further investigation. Of particular interest was the influence of the frequency relations between the dynamic wheel loads and the natural frequencies of the bridge as well as the influence of pavement roughness.

The tests on the Deibüel Bridge which are described here were therefore arranged to permit the measurement and systematic variation of the corresponding parameters. An appropriate processing of the measured signals furnished the basis for the development of simple models in the subsequent, fundamental investigation of the problem.

In the above-mentioned tests the longitudinal profile of the two pavements employed was precisely measured. In addition, the dynamic wheel loads of the test vehicles, four leaf-sprung two-axle trucks were measured. The natural frequencies and mode shapes of the 110 m long bridge were determined through harmonic excitation; its deflection during the passage of the vehicles was measured at the midpoint of each of the three spans. Aside from an analysis in the time domain, the data processing concentrated on an investigation of the measured signals in the frequency domain.

The results of the tests on the Deibüel Bridge can be summarized as follows:

The spectrum of the dynamic wheel loads covers a range  $f = 1 \dots 5$  Hz and always exhibits several peaks. The predominant wheel load frequency lies between  $f = 1.5$  Hz and  $f = 3.5$  Hz. This frequency is determined by the pavement roughness, the vehicle speed and the stiffness of the suspension springs. Of crucial importance is the degree of activation of the suspension springs: When the leaf springs are blocked, the predominant wheel load occurs at the upper end of the frequency range mentioned, with activated springs toward the lower end.

For a two-axle truck the vibrational behavior can lie somewhere between a pure heave and a pure pitch motion. At lower speeds heave vibrations tend to be observed, at higher speeds solely pitch vibrations.

All natural vibrations of the bridge with frequencies in the region  $f = 1 \dots 6$  Hz and their respective mode shapes influence the behavior of the bridge significantly. This is due to the interaction between the vehicle and bridge as discussed below.

There were no indications that the bridge motion has a significant influence on the behavior of the vehicle.

Pavement roughness is the only parameter of the problem under discussion which is open to treatment with stochastic methods. However, based on the relationship between the bridge spans and the longest significant wavelength of unevenness it was found necessary to take the precise longitudinal pavement profile in its deterministic form into account.

For the passages at lower vehicle speeds the frequency analysis proved to be a quite acceptable tool. However at speeds above 45 km/h the frequency resolution was too poor to allow a detailed evaluation of the interaction between vehicle and bridge. Nevertheless the results obtained at the lower speeds were able to serve as a basis for evaluating some simple interaction models.

A two-mass oscillator model composed of simple oscillators for the vehicle and for the bridge yielded the first successful attempts to interpret the considerable frequency shifts occurring during a vehicle passage. These shifts were observed in the dynamic wheel loads as well as in the bridge response. In further refinements of the modelling and interpretation the bridge was represented as a continuous frame and the analysis range of the frequency analysis was no longer extended over the entire bridge but was limited to the individual spans.

It was found that the vehicle/bridge interaction, resp. the coupling of both of these mechanical systems is of pivotal importance to the resulting motions. During the passage, the coupling vehicle/bridge changes several times from the stage "decoupled" (when the vehicle is near the supports) to "closely coupled" (when the vehicle is near the midpoint of the respective span). Furthermore, since the condition "closely coupled" is not the same for all of the spans, the degree of coupling vehicle/bridge varies considerably during a passage. This was verified by the frequency analyses.

Of primary interest is the bridge response. This is composed of vehicle-forced vibrations, vibrations resulting from a coupling of the mechanical systems "vehicle" and "bridge" and natural vibrations of the bridge. Beating is often observed.