

Dynamische Fahrzeug-Brücken-Interaktion

Reto Cantieni

rci dynamics, Ingenieurbüro für Baudynamik, Dübendorf

1 EINLEITUNG

Wenn sich ein Fahrzeug über eine Brücke bewegt, resultiert eine grössere maximale Durchbiegung als wenn die Brücke mit dem gleichen Fahrzeug statisch belastet wird. Diese Feststellung ist schon ziemlich bejährt, sie wurde nämlich im Jahre 1847 von Willis im Zusammenhang mit der Untersuchung von Einstürzen von Eisenbahnbrücken publiziert (Willis (1851)). Die Modelle, die den damals durchgeführten analytischen Untersuchungen zu Grunde gelegt wurden (Stokes (1849)), waren einfach:

- Eine konstante Kraft bewegt sich über einen einfachen Balken,
- eine konzentrierte Masse bewegt sich über einen einfachen Balken.

Solche Modelle haben den Vorteil, dass geschlossene analytische Lösungen erarbeitet werden können. Ihr Nachteil ist, dass das Modell für das System "Fahrzeug" doch sehr rudimentär ist. Dies gilt vor allem für modernere Strassenfahrzeuge, deren dynamische Freiheitsgrade sich mit der Einführung von komplexen Aufhängungssystemen stark erweitert haben.

Untersucht man die Vorgänge, die bei der Fahrt eines Fahrzeuges über eine Brücke auftreten, kann zwischen drei Effekten unterschieden werden:

- dem Geschwindigkeitseffekt (Fahrzeug als bewegte, konstante Kraft),
- dem Masseneffekt (Fahrzeug als bewegte, konstante Masse), und
- dem Interaktionseffekt (Fahrzeug als bewegtes, dynamisches System).

Der Geschwindigkeitseffekt, bei dem die Relation zwischen der Überfahrtdauer und der Periode der Grundschiwingung der Brücke wesentlich ist, kann für Strassen-Probleme meist vernachlässigt werden. Er ist in letzter Zeit im Zusammenhang mit Brücken für Hochgeschwindigkeits-Bahnlinien aber wieder aktuell geworden.

Für Strassenbrücken ist der Masseneffekt im Vergleich zum Interaktionseffekt vernachlässigbar klein. Die wird in der Folge gezeigt werden.

Will man sich mit dem Interaktionseffekt beschäftigen, muss zunächst einigermaßen Klarheit bezüglich der dynamischen Charakteristika der beteiligten Systeme "Fahrzeug" und "Brücke" herrschen. Der vorliegende Bericht stützt sich auf Arbeiten, die in den Jahren 1977 bis 1997 an der EMPA durchgeführt worden sind beziehungsweise auf die zugehörigen Publikationen.

2 DAS DYNAMISCHE SYSTEM "BRÜCKE"

Verglichen mit einem Fahrzeug ist eine Brücke ein einfaches System: Seine dynamischen Eigenschaften sind im wesentlichen linear und zeitinvariant. Die Streuungen der dynamischen Charakteristika einer Brücke, die natürlich immer auftreten, mögen im Zusammenhang mit "Health Monitoring" von Interesse sein; im vorliegenden Zusammenhang sind sie es nicht.

Von zentraler Bedeutung ist die Grundfrequenz einer Brücke.

Die zugehörige Schwingungsform ist immer einfach (keine Knoten in den Brückenfeldern) und damit empfänglich für die Anregung durch dynamische Radlasten. Die zugehörige Dämpfung streut für Betonbrücken im Bereich $\zeta = 0.5...2\%$. Sie spielt höchstens eine sekundäre Rolle.

Die Grundfrequenz der Strassenbrücken in der Schweiz liegt schwergewichtig im Bereich von $f = 2...4$ Hz (Abb. 1).

Der Aufwand, der für die experimentelle Bestimmung der dynamischen Charakteristika einer Brücke getrieben werden muss, hängt von der Komplexität der Tragstruktur und den Anforderungen ab.

Im Falle eines einfachen Balkens genügt es, in einem Punkt den Ausschwingvorgang der Brücke nach der Überfahrt eines schweren Fahrzeuges zu messen und (allenfalls von Hand) zu analysieren (Abb. 2).

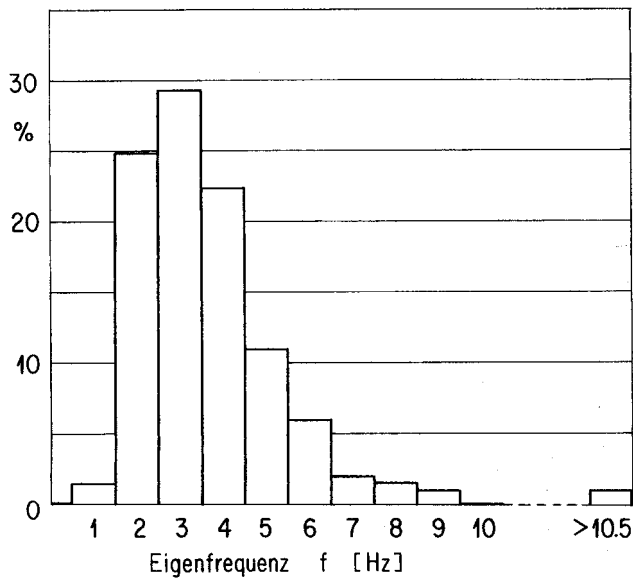


Abb. 1: Grundfrequenz von 202 Betonbrücken in der Schweiz (Cantieni (1992)).

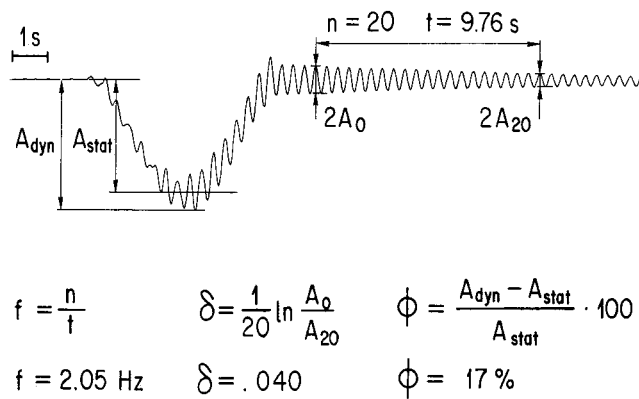


Abb. 2: Bestimmung von Grundfrequenz f, log. Dämpfungsdekrement δ und dynamischem Inkrement ϕ (Durchbiegungssignal eines einfachen Balkens).

Für komplexere Tragwerke, und falls neben den Eigenfrequenzen auch die zugehörigen Schwingungsformen und Dämpfungsgrößen von Interesse sind, bieten sich zwei Methoden an:

- Forced Vibration Testing (FVT) und
- Ambient Vibration Testing (AVT).

Beiden Methoden gemeinsam ist, dass die Anzahl der Messpunkte durch Umsetzen der Aufnehmer beliebig hoch getrieben werden kann. Je höher diese Anzahl, desto besser die grafische Auflösung der Eigenformen. Als Bezugspunkt für das Zusammensetzen insbesondere der Eigenformen dient bei FVT das Kraftsignal, bei AVT das (bzw. die) Referenzpunktsignal(e). Diese Methoden sollen an einer dreifeldrigen Brücke (Abb. 3 und 4), die weiter unten auch für die Diskussion von Interaktionsphänomenen verwendet wird, kurz vorgestellt werden.

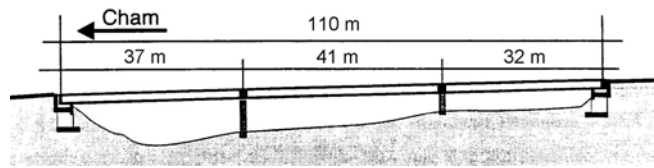


Abb. 3: Deibüel-Brücke: Längsschnitt. Querschnitt: einzelliger Kasten, 12 m breit, 1.8 m hoch. Spannbeton.



Abb. 4: Deibüel-Brücke.

Bei der FVT-Methode wird die Brücke mittels eines Erregers zu Schwingungen angeregt. Für die Anregung von Brücken mit einer Grundfrequenz $f = 2 \dots 4$ Hz ist die Verwendung eines servohydraulischen Erregers angezeigt. Andere Methoden können für Brücken mit einer Grundfrequenz ausserhalb dieses Bandes verwendet werden (Impuls, AVT). Mit servohydraulischen Erregern können schmalbandige Sinus- oder breitbandige Rauschsignale erzeugt werden. Durch zweckmässige Wahl der Dauer der Anregung kann die Qualität der Resultate beeinflusst werden.

Die Vorteile der FVT-Methode:

- Die anregende Kraft wird mitgemessen, so dass die modalen Resultate bezüglich Masse und Steifigkeit skaliert sind. Sie können deshalb direkt für die Aufdatierung von FE-Modellen verwendet werden.
- Wenn die anregende Kraft wesentlich grösser als die Störkräfte ist, resultieren rein physikalische Eigenschwingungen.

Die Nachteile der FVT-Methode:

- Der Aufwand für die Erzeugung der künstlichen Anregung ist gross (Abb. 5 und 6),
- Störende Anregungsquellen müssen ausgeschaltet werden. Für Strassenbrücken empfiehlt es sich deshalb, den Verkehr während der Messungen zu unterbrechen.



Abb. 5: Servohydraulischer Schwingungserreger.



Abb. 6: Infrastruktur für den Schwinger

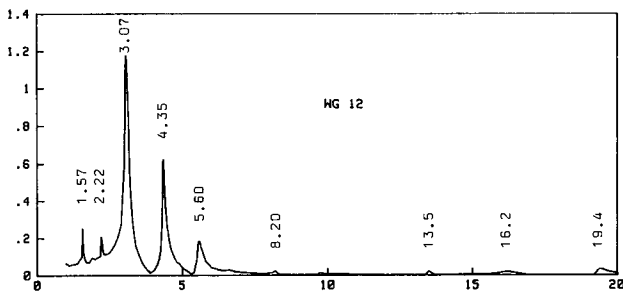


Abb. 7: Deibüel-Brücke; Spektrum für harmonische Anregung.

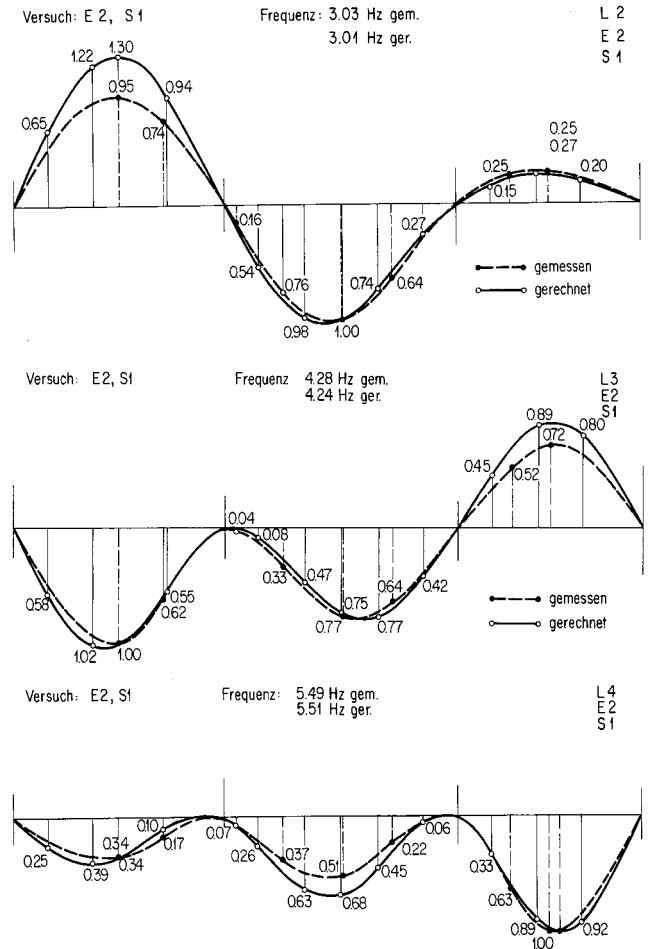


Abb. 8: Deibüel-Brücke: Erste drei Eigenfrequenzen und Eigenformen (hier im Vergleich mit den Resultaten einer numerischen Berechnung).

Bei der AVT-Methode werden die Tragwerkschwingungen gemessen, die durch ambiente Erregungen (z.B. Wind, Verkehr usw.) erzeugt werden.

Die Vorteile der AVT-Methode:

- Keine künstliche Anregung erforderlich,
- Besonders geeignet für tieffrequente Tragwerke ($f < 1$ Hz), für die eine künstliche Anregung praktisch nicht möglich ist,
- Für Strassenbrücken: Messung unter Verkehr möglich.

Die Nachteile der AVT-Methode:

- Die modalen Resultate sind unskaliert,
- Es ist nicht immer leicht, physikalische und Noise Modes auseinander zu halten.

Ein Vergleich der Resultate von FVT- und AVT-Versuchen an der Deibüel-Brücke kann (Felber et al (1996)) entnommen werden.

3 DAS DYNAMISCHE SYSTEM "FAHRZEUG"

Ein schweres Strassenfahrzeug setzt sich im wesentlichen aus den folgenden Elementen zusammen:

- Aufbau- und Achsmasse,
- Aufbau- und Achsaufhängung,
- Achsmasse ("ungefederte" Masse),
- Reifen.

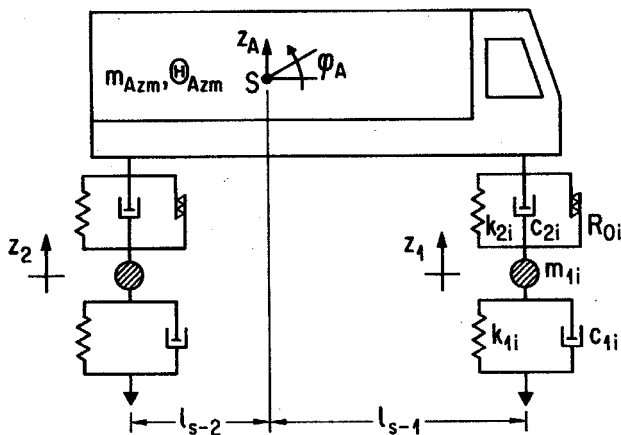


Abb. 9: Schematisches Modell eines Zweiachsers.

Mit Ausnahme der Aufbau-Aufhängung sind diese Elemente mehr oder weniger zeitinvariant und linear. Bei den Reifen spielt der Reifendruck eine gewisse Rolle; die Reifendämpfung ist zu gering, um wichtig zu sein. Das kritische Element ist die Aufbau-Aufhängung. Sie besteht aus Feder- und Dämpferelementen. Hier ist zwischen Blattfederungen und modernen Aufhängungen zu unterscheiden.

Eine Blattfeder federt und dämpft gleichzeitig. Dies allerdings nur, wenn die Anregung eine gewisse Intensität überschreitet. Eine Blattfeder wird erst aktiv, wenn die Reibung zwischen den einzelnen Federblättern überwunden wird. Ansonsten ist sie passiv, d.h. die Reifen sind dann das einzige Feder/Dämpferelement des Systems "Fahrzeug", das dynamisch aktiv ist. Dies führt dazu, dass die dynamischen Charakteristika eines blattgefederten Fahrzeuges sehr stark nicht-linear sind. Je nach Fahrgeschwindigkeit und Fahrbahnebenheit ist die Blattfeder blockiert, teilweise oder vollständig aktiv.

Bei modernen Aufhängungen wie beispielsweise "Low-Friction" oder Luftfedern sind die Feder- und Dämpferelemente immer aktiv.

Für die experimentelle Bestimmung der dynamischen Charakteristika eines Lastwagens stehen im Prinzip wiederum zwei Methoden zur Verfügung:

- Prüfstandversuch (FVT), und
- Fahrversuch (AVT).

Bei der FVT stellt man das Fahrzeug auf eine servohydraulische Anlage und erregt es künstlich.

Bei der AVT misst man die dynamischen Radlasten während der Fahrt auf einer natürlichen Fahrbahn.

Im Falle der hier diskutierten EMPA-Versuche wurden verschiedene blattgefederte, zweiachsige Lastwagen in der Versuchsanlage der Firma Magirus-Deutz in Ulm einem FVT-Versuch unterworfen (Cantieni (1992)). Dabei konnte jeweils eine Achse des Fahrzeuges harmonisch, mit über den Frequenzbereich konstanter Amplitude angeregt werden. Das Resultat: Ein schweres Fahrzeug weist zwei grundsätzlich zu unterscheidende dynamische Verhaltensmuster auf:

- Aufbaueigenschwingungen (Hub- oder Nickschwingungen), $f = 1.5...3$ Hz,
- Achseigenschwingungen, $f = 7...15$ Hz.

Bei Aufbauschwingungen bewegt sich primär die Aufbaumasse. Die Frequenz liegt bei aktiver Aufbaufeder bei $f = 1.5...2$ Hz, bei blockierter Aufbaufeder bei $f = 2.5...3$ Hz. Die Aufbaumasse schwingt in letzterem Fall lediglich auf der Reifenfeder. Bei Achseigenschwingungen bewegt sich der Aufbau nicht, die Achsmasse dagegen bewegt sich zwischen Aufbau und Fahrbahnoberfläche hin und her. Die Aufbaufeder muss aktiv sein. Die Frequenz liegt im Bereich $f = 7...15$ Hz.



Abb. 10: Harmonische Anregung der Hinterachse..

Mit einer Anregungsamplitude von 3...5 mm wird eine Blattfeder im Bereich der Aufbauschwingungen ($f = 2.5...3$ Hz) nicht aktiviert; das Fahrzeug schwingt lediglich auf den Reifen (Abb. 11). Eine Aktivierung der Blattfeder wird dagegen im Bereich der Achseigenschwingungen ($f \approx 12$ Hz) erzwungen.

Untersucht man das Unebenheitsspektrum einer natürlichen Fahrbahn, stellt man fest, dass langwellige Unebenheiten wesentlich grössere Amplituden aufweisen als kurzwellige (Abb. 12).

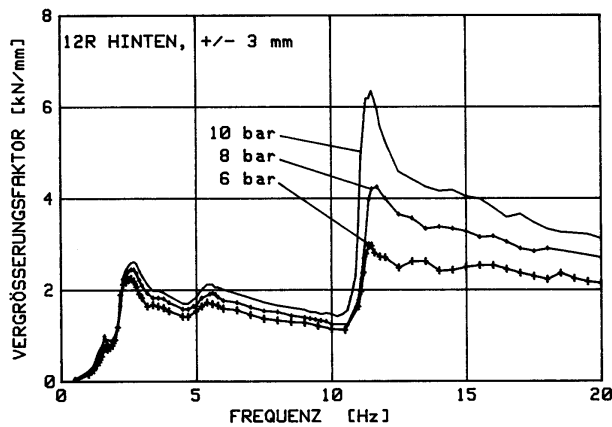


Abb. 11: Harmonische Anregung der Hinterachse. Anregungsamplitude konstant, Reifendruck variabel.

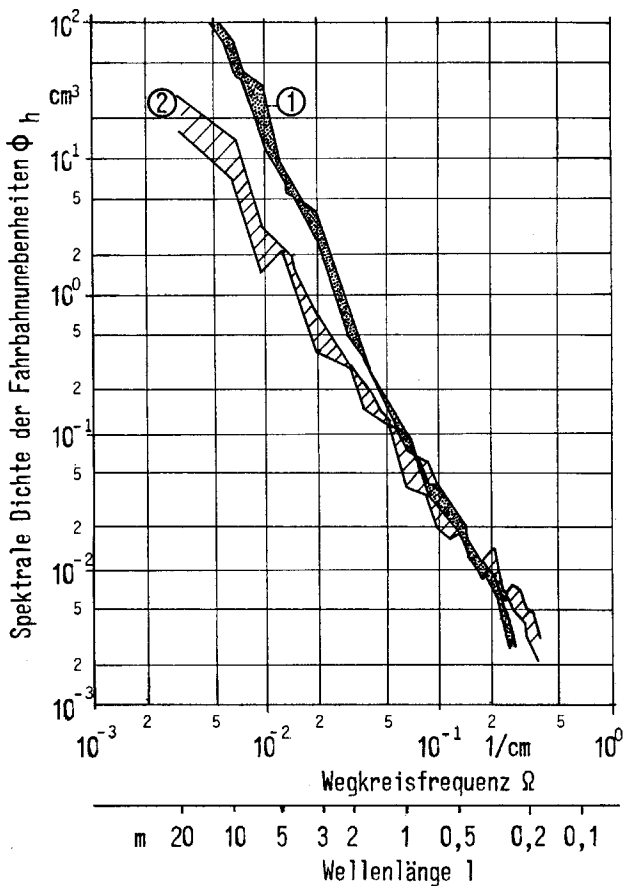


Abb. 12: Unebenheitsspektren.

Moderne Prüfanlagen berücksichtigen diese Tatsache und tragen der Nichtlinearität der Aufbauaufhängung eines Lastwagens damit Rechnung.

Die Anwendung der AVT-Methode zur Bestimmung der dynamischen Charakteristika der Radlasten schwerer Fahrzeuge setzt voraus, dass eine Vorrichtung verfügbar ist, mit der dynamische Radlasten

während der Fahrt gemessen werden können. Dazu stehen verschiedene Technologien zur Verfügung.

Die aufwendigste besteht darin, dass die Nabe einer Achse mit Dehnmessstreifen bestückt und zweckmässig kalibriert wird (Beispiel: Daimler-Benz). Diese Methode ist sehr exakt. Ihr Hauptnachteil ist, dass ein bestimmtes Rad oder Fahrzeug instrumentiert wird, und damit Parametervariationen nur begrenzt möglich sind.

Eine andere Methode arbeitet mit einer Kombination von Dehnmessstreifen auf der Nabe und Beschleunigungssensoren auf der Fahrzeugachse (Beispiel: NRC, Canada). Hier ist man wiederum auf ein bestimmtes Fahrzeug beschränkt. Allerdings können beim NRC-Versuchsfahrzeug die Aufbauaufhängungen ausgewechselt werden. Dieser Umstand wurde beim OECD DIVINE Projekt ausgenutzt (Cantieni et al (2000)).

Ferner kann man sich den Umstand zu Nutze machen, dass die dynamische Radlast indirekt über die vertikale Verformung der Reifen gemessen werden kann. Das von der Firma Jenzer AG im Auftrag der EMPA entwickelte, optoelektronische System misst den Abstand zwischen der Fahrzeugachse und der Belagsoberfläche, indem ein Infrarotsender einen Fleck auf der Fahrbahnoberfläche erzeugt und eine Kamera die Lage dieses Flecks erfasst. Sender und Kamera sind unter einem Winkel von 45 Grad angeordnet (Abb.13). Die geometrische Nichtlinearität des Verfahrens wird elektronisch kompensiert.

Die Abbildungen 14 und 15 zeigen Frequenzspektren der dynamischen Radlast für die vier Räder eines Zweiachsers. Es ist deutlich zu erkennen, dass die dominanten Frequenzen mit Zunahme der Geschwindigkeit zu tieferen Werten tendieren.



Abb. 13: Optoelektronische Systeme für die Messung dynamischer Radlasten, hier an den beiden Hinterrädern eines Zweiachsers.

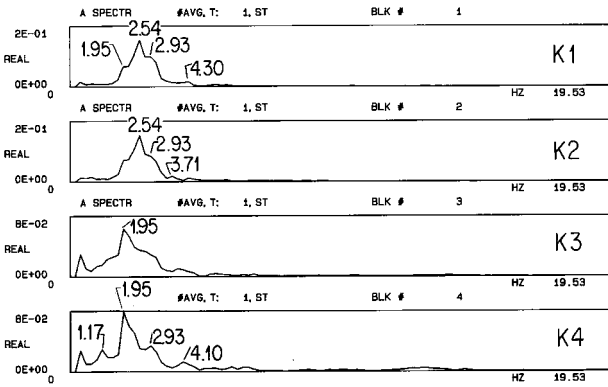


Abb. 14: Radlastspektren für $v = 23 \text{ km/h}$ (K1 und K2: hinten links und rechts, K3 und K4 vorne links und rechts).

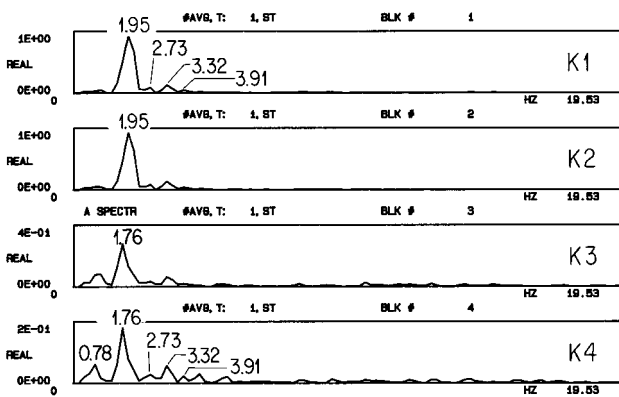


Abb. 15: Radlastspektren für 63 km/h .



Abb. 16: Fahrerhauselektronik.

4 FAHRZEUG-BRÜCKEN-INTERAKTION

Um Interaktionsprozesse experimentell untersuchen zu können, müssen Brücke und Fahrzeug zweckmässig instrumentiert werden. Ferner müssen die gemessenen dynamischen Radlasten vom Fahrzeug zur Messzentrale übertragen werden, wo sie simultan mit den Brückenreaktionen aufgezeichnet werden. Dies kann mittels eines Radiotelemetrie-Links geschehen (Abb. 16).

Die Analyse eines Ausschwingvorganges der Brücke ergibt, dass, wie erwartet, die drei ersten Grundschwingungen der Brücke (3.03 Hz, 4.35 Hz, 5.6 Hz) vorhanden sind (Abb.17).

Analysiert man die Durchbiegung der Brücke während der Überfahrt, kann beobachtet werden, dass neben der Grundschwingung weitere Schwingungen im Bereich von $\Delta f = \pm 0.3 \text{ Hz}$ auftreten. Ein Beispiel dazu zeigt Abb. 18. In der Abbildung 19 sind solche Brückenspektren in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Peak-Frequenz der Brückenreaktion in einem Band von rund $\Delta f = \pm 0.3 \text{ Hz}$ Breite um die Grundfrequenz der Brücke auftritt. Weitere sekundäre Peaks treten im Bereich der zweiten und dritten Eigenfrequenz der Brücke auf.

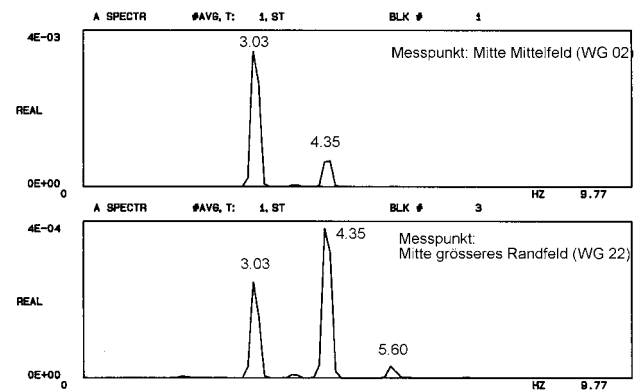


Abb. 17: NBr

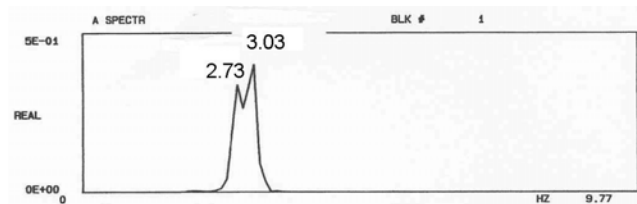


Abb. 18: WBr.

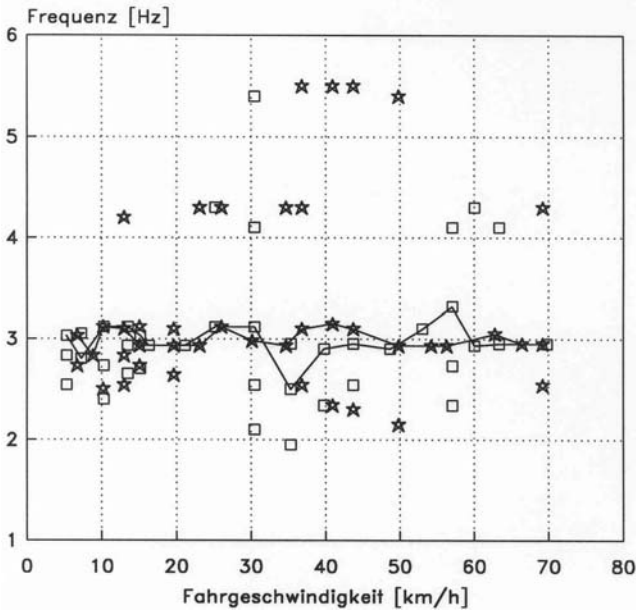


Abb. 19: Brückenspektren in Funktion der Fahrgeschwindigkeit.

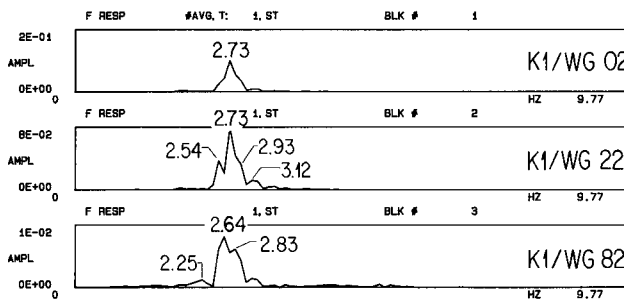


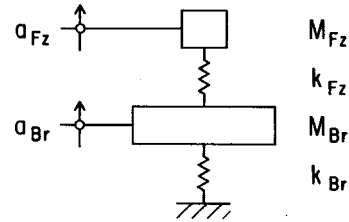
Abb. 20: Kreuzleistungsspektren Durchbiegung der Brücke/dynamische Radlast, v = 17 km/h.

In einem nächsten Analyseschritt können die Kreuzleistungsspektren, gebildet aus den Durchbiegung in der Mitte der drei Brückenfelder (und z.B. der Radlast hinten links, K1, gebildet werden (Abb. 20). Diese Spektren geben an, bei welchen Frequenzen sowohl die Brücke als auch das Fahrzeug dynamisch aktiv sind. Stellt man diese Interaktionsspektren als Funktion der Fahrgeschwindigkeit dar, erhält man ein ähnliches Bild, wie es in Abbildung 19 für die Brückenspektren gezeigt wird.

Wie können diese Frequenzverschiebungen erklärt werden? Zunächst ergibt eine entsprechende Rechnung, dass der Masseneffekt im Fall der Deibüel-Brücke bei Überfahrt eines 16-t-Zweiachsers für eine solche Erklärung nicht genügt. Die zugehörige Frequenzverschiebung beträgt rund $\Delta f = 0.06$ Hz.

Als etwas komplizierteres Modell bietet sich an, Fahrzeug und Brücke je als ungedämpfte Einmassenschwinger zu modellieren und das Verhalten bei Koppelung der beiden Schwinger zu untersuchen. Die Steifigkeit der Reifenfeder ist dabei die Systemvariab-

le. Abb. 21 zeigt das Modell für den Fall gleicher Grundfrequenz für die beiden Einmassenschwinger. Man erhält ein System mit zwei Eigenfrequenzen, die je um etwa 0.25 Hz beidseits der gemeinsamen Grundfrequenz liegen. Abb. 22 zeigt den Einfluss der Radlastfrequenz auf das Koppelungsverhalten.



Die entkoppelten Systeme :

Brücke : $M_{Br} = 442.6 \cdot 10^3$ kg
 $k_{Br} = 160.2 \cdot 10^6$ N/m
 $f_{Br} = 3.03$ Hz

Fahrzeug : $M_{Fz} = 16.5 \cdot 10^3$ kg
 $f_{Fz} = 3.03$ Hz
 $\rightarrow k_{Fz} = 6.0 \cdot 10^6$ N/m

Das gekoppelte System :

$$(\omega^2)^2 - \left(\frac{k_{Br} + k_{Fz}}{M_{Br}} + \frac{k_{Fz}}{M_{Fz}} \right) \omega^2 + \frac{k_{Br} \cdot k_{Fz}}{M_{Br} \cdot M_{Fz}} = 0$$

$$\rightarrow \left\| \begin{array}{l} f_1 = 3.33 \text{ Hz} \\ f_2 = 2.75 \text{ Hz} \end{array} \right\|$$

Abb. 21: Zweimassenschwinger Fahrzeug-Brücke

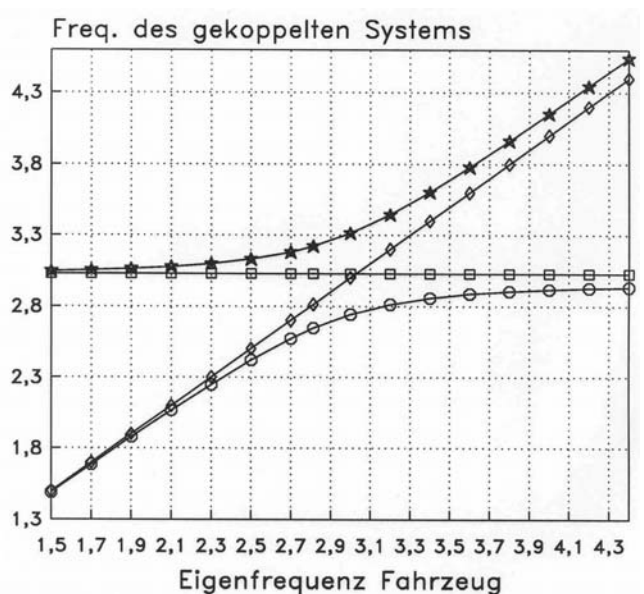


Abb. 22: Einfluss der Radlastfrequenz auf das Koppelungsverhalten Brücke/Fahrzeug.

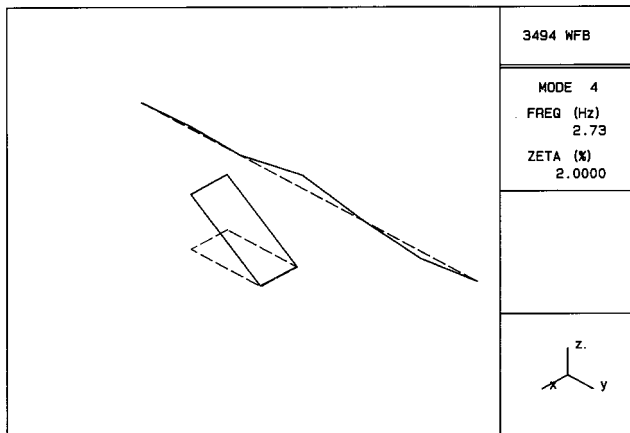


Abb. 23: Interaktionsshapen 2.73 Hz

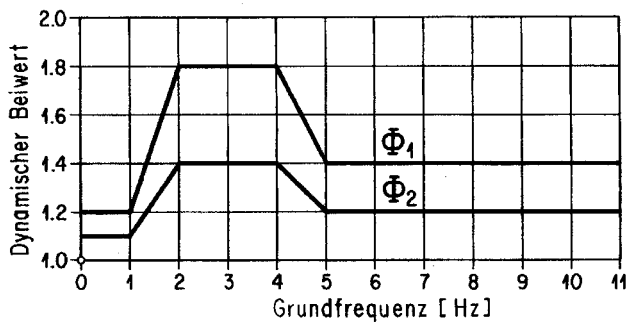


Abb. 24: Normvorschlag für phi

5 LITERATUR

Cantieni, R. (1992), Beitrag zur Dynamik von Strassenbrücken unter der Überfahrt schwerer Fahrzeuge, *EMPA Bericht Nr. 220*.

Cantieni, R. & Krebs, W. & Heywood, R. (2000), OECD IR6 DIVINE Project - Dynamic Interaction Between Vehicle and Infrastructure Experiment - Element 6, Bridge Research - Final Report, *EMPA Test Report No. 153'031*.

Felber, A.J. & Cantieni, R. (1996), Introduction of a New Ambient Vibration Testing System - Description of the System and Seven Bridge Tests, *EMPA Test Report No. 156'521*.

Stokes, G.G. (1849), Discussion of a Differential Equation Relating to the Breaking of Railway Bridges, *Trans. of the Cambridge Philosophical Society VIII, Part V, No. LII*.

Willis, R. (1851), An Essay on the effects Produced by Causing Weights to Travel Over Elastic Bars, *Published as an Addendum to Barlow, P., A Treatise on the Strength of Timber, Cast and Malleable Iron. John Weale, London*.