

# Einsatz von Vibrowalzen für die Verdichtung von Schwarzbelägen auf Brücken

*Die Frage, ob Vibrationswalzen für den Einbau von Schwarzbelägen auf Brücken verwendet werden dürfen oder nicht, wird von den verschiedenen Bauherren in der Schweiz unterschiedlich beantwortet. Um diesbezüglich eine experimentelle Entscheidungsgrundlage zu erarbeiten, führte der Verfasser im Auftrag der Firma Robert Aebi AG Messungen an der Brücke A110 durch. Diese Brücke führt eine zweispurige Strasse bei Roggwil/Wynau über die Eisenbahnlinien der SBB-Neubau-strecke Mattstetten–Rothrist. Die Brücke A110 wurde ausgewählt, weil der Belageinbau anstand und sich alle Beteiligten mit der Durchführung der nicht unkritischen Versuche einverstanden erklärten.*

Von **Reto Cantieni** \*

Das Ziel der Versuche war, festzustellen, ob bei Verwendung von Vibrationswalzen für den Einbau des Schwarzbelages auf der Brücke unzulässige Brückenschwingungen erzeugt würden, oder nicht. Die Versuche sollten sowohl die Verwendung einer Automatikwalze als auch einer konventionellen Vibrationswalze abdecken. Die Versuche wurden im Einverständnis und in enger Zusammenarbeit mit dem Bauherrn, den SBB, und dem bauleitenden Ingenieurbüro, DSP Dobler, Schällibaum + Partner durchgeführt und von der Firma Robert Aebi organisiert. Die Bauunternehmung F. Witschi, Langenthal, war für den Einbau des Belages auf dieser neuen Brücke zuständig. Es wurde vereinbart, dass bei Überschreiten einer Schwinggeschwindigkeit  $v = 20$  mm/s die Versuche abgebrochen und der Belag mit statischen Walzen fertig verdichtet würde. Gemäss der VSS-Norm SN 640312a «Erschütterungen, Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke» [1] wären  $v = 24$  mm/s zulässig. Man behält sich also noch eine gewisse Reserve vor.



1: Die Vibrowalzen Dynapac CC 232 (links) und Ammann AV 95 (rechts).  
1: Les rouleaux vibrants Dynapac CC 232 (à gauche) et Ammann AV 95 (à droite).

Die während des Einbaus gemessene, maximale Schwinggeschwindigkeit überschritt für beide Walzentypen  $v = 15$  mm/s nicht. Mit Hilfe einer Untersuchung des Frequenzinhaltes der Brückenschwingungen wurde versucht, nachträglich eine Begründung für diese Tatsache zu erarbeiten. Diese Untersuchung basiert einer-



\* **Reto Cantieni**,  
Dr. sc. techn. ETH, dipl. Bau-  
ing. ETH/SIA, rci dynamics,  
Ingenieurbüro für Bau-  
dynamik, Dübendorf

## Recours à des rouleaux vibrants pour le compactage d'enrobés sur des ponts

*Peut-on recourir ou non aux rouleaux vibrants pour le compactage lors de la pose d'enrobés bitumineux sur les ponts? La réponse diverge selon les maîtres d'ouvrage en Suisse. Afin d'élaborer par expérience des bases de décision, l'auteur a entrepris des mesures sur le pont A110 à la demande de l'entreprise Robert Aebi SA. Ce pont se trouve sur la route à deux voies franchissant la nouvelle ligne ferroviaire des CFF entre Mattstetten et Rothrist près de Roggwil/Wynau. Ce pont a été choisi parce que le revêtement allait être posé et que toutes les parties concernées se sont déclarées prêtes au déroulement de ce test pas forcément sans risques.*

seits auf der experimentellen Identifikation der Eigenschwingungen der unbelasteten Brücke und andererseits auf den Frequenzspektren der durch die Walzen erzeugten Schwingungen.

## Die Walzen

Der Feldversuch ergab zunächst, dass, wie erwartet, die massgebenden dynamischen Einwirkungen von «grossen», 8 bis 10 Tonnen schweren Vibrowalzen erzeugt werden, und dass die anderen Einbaugeräte wie Fertiger und «kleine», rund 2,5 Tonnen schwere Vibrowalzen diesbezüglich vernachlässigt werden können.

Für die Versuche wurden eine automatische Walze AV 95 und eine konventionelle Walze CC 232 eingesetzt (Abb. 1). Bei Automatikwalzen wird die Einwirkungsweise, das heisst Amplitude und Frequenz der ausgeübten (Zentrifugal-)Kraft, automatisch dem Verdichtungsgrad des Belages angepasst, bei den konventionellen Walzen ist dies nicht der Fall. Immerhin kann bei der hier verwendeten konventionellen Walze CC 232 manuell zwischen einer tieffrequenten Einwirkung mit grosser Amplitude und einer hochfrequenten Einwirkung mit kleiner Amplitude umgeschaltet werden.

Die technischen Daten der beiden Vibrowalzen sind, zum Teil unter Verwendung nicht-SI-konformer, aber branchenüblicher, physikalischer Einheiten in der Abbildung 2 zusammengestellt.

## Die Brücke

Die Brücke A110 weist drei Felder von rund 15 bis 20 m Länge sowie eine Gesamtbreite von 13,2 bis 16,4 m auf. Der Querschnitt ist als massive, durchlaufende, 0,9 m dicke Stahlbetonplatte mit beidseitigem Kragarm ausgebildet. Die jeweils zwei Innenstützen weisen einen kreisförmigen Querschnitt mit Durchmesser 0,9 m auf und sind sowohl in den Brückenüberbau als auch in die flachen Fundamente eingespannt (Abb. 3 bis 5). In Längsrichtung ist die Brücke schwimmend gelagert.

## Experimentelle Bestimmung der Eigenschwingungen der Brücke; Vorgehen

An der unbelasteten Brücke wurde eine experimentelle Modalanalyse durchgeführt. Dabei wurden die ambient angeregten Schwingungen der Brücke gemessen und daraus die Eigenschwingungen der Brücke identifiziert. Dazu wurden zwei hochempfindliche Beschleunigungsaufnehmer PCB 393B31 eingesetzt (Empfindlichkeit 10 V/g, Auflösung  $10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>, Messbereich  $\pm 1$  g). Diese erfassten die Beschleunigung in vertikaler Richtung. Die Aufnehmer waren auf mit der Brücke verschraubten, nivellierbaren Aluminiumplatten befestigt (Abb. 6).

Der insgesamt 21 Punkte umfassende Messpunktraster ist in Abbildung 7 grafisch dargestellt (vgl. auch Abb. 4). Von den Punkten 1 bis 3 und 19 bis 21 konnte mit genügend guter Näherung angenommen werden, sie würden sich in vertikaler Richtung nicht bewegen. Damit ergaben sich 14 Messzyklen, bei denen jeweils im Referenzpunkt 10 und einem der übrigen 14 Messpunkte gemessen wurde.

	<b>Ammann AV 95 (Automatikwalze)</b>	<b>Dynapac CC 232 (konventionelle Walze)</b>
Betriebsgewicht CECE	9500 kg	8000 kg
Bandagenbreite	1600 mm	1447 mm
Motorleistung	64 kW	53 kW
Arbeitsdrehzahl des Motors	2300 U/min = 38.3 Hz	
Nennndrehzahl des Motors		2800 U/min = 46.7 Hz
Vibration: Amplitude	0,62/0,4/0,3/0,1 mm	0,50 mm bei 52 Hz 0,22 mm bei 70 Hz
Vibration: Frequenz	25...50 Hz	52 Hz, 70 Hz
Vibration: Zentrifugalkraft pro Bandage	7...52 kN	89 kN bei 0,50 mm/52 Hz 65 kN bei 0,22 mm/70 Hz
Vibration: Zentrifugalkraft pro cm Bandagenbreite	44...325 N/cm	615 N/cm bei 52 Hz 449 N/cm bei 70 Hz

2

2: Technische Daten der verwendeten Vibrowalzen.

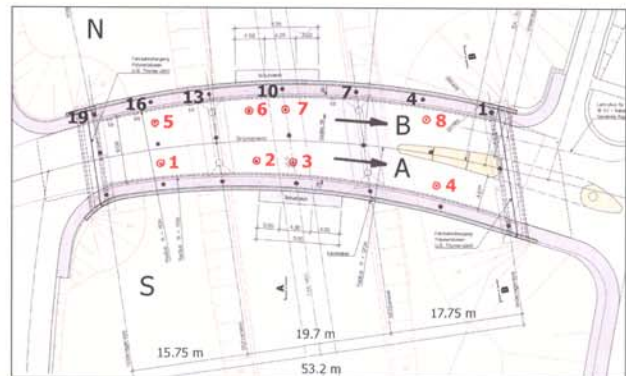
2: Caractéristiques techniques des rouleaux vibrants employés.



3

3: Die Brücke A110 bei Roggwil.

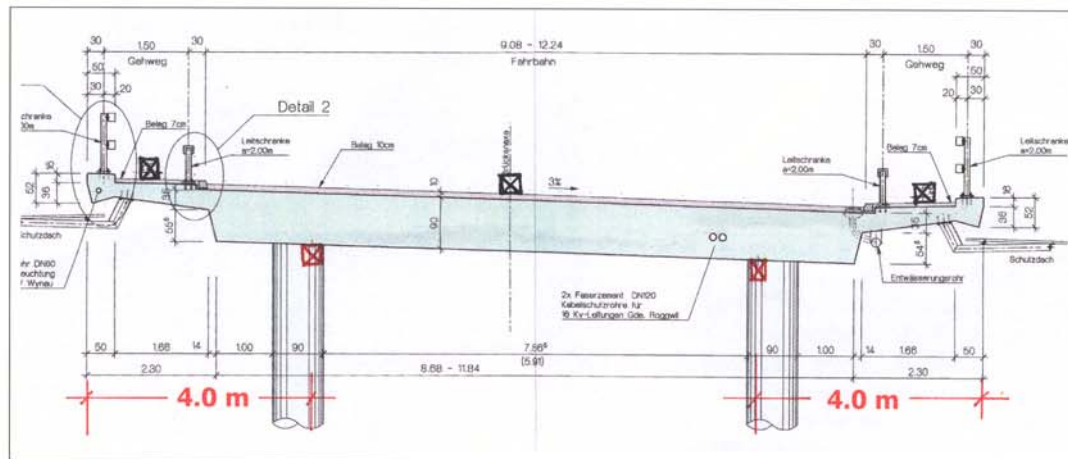
3: Le pont A110 près de Roggwil.



4

4: Grundriss der Brücke A110. Schwarz: Messpunkte 1 bis 21 für die ambienten Versuche (nur nördliche Achse nummeriert), rot: Messpunkte MP 1 bis MP 8 für die Versuche unter Einwirkung der Vibrationswalzen. Ebenfalls eingetragen sind die Fahrachsen A und B für die Walzen.

4: Plan de situation du pont A110. En noir: points de mesure 1 à 21 pour les essais ambients (la numérotation concerne uniquement l'axe nord); en rouge: points de mesure MP1 à MP 8 pour les essais avec les rouleaux vibrants. Sont également indiqués les axes de compactage A et B.



5

5: Querschnitt der Brücke A110. Schwarz: Lage der Messpunkte 1 bis 21 für die ambienten Versuche, rot: Lage der Messpunkte MP 1 bis MP 8 für die Versuche unter Einwirkung der Vibrationswalzen.

5: Plan en coupe du pont A110. En noir: points de mesure 1 à 21 pour les essais ambiants; en rouge: points de mesure MP1 à MP 8 pour les essais avec les rouleaux vibrants.

Die technischen Parameter der Signalerfassung waren:

Abtastrate:  $s = 512 \text{ Hz}$   
 Obere Grenzfrequenz:  $f_c = 200 \text{ Hz}$   
 Fensterlänge:  $T = 300 \text{ s}$

Für die Bestimmung der Schwingungsformen wurde das Softwarepaket ARTeMIS Extractor beziehungsweise die dort angebotene Methode FDD eingesetzt (FDD = Frequency Domain Decomposition). Der Analysebereich wurde dabei auf den Bereich der Einwirkungsfrequenzen von Vibrowalzen,  $f = 35 \dots 70 \text{ Hz}$ , plus mindestens noch die erste Lastharmonische, das heisst  $f = 70 \dots 140 \text{ Hz}$ , abgestimmt.

### Experimentelle Bestimmung der Eigenschwingungen der Brücke: Resultate

Im Bereich  $f = 5.00 \dots 133.8 \text{ Hz}$  konnten 15 Eigenschwingungen der Brücke identifiziert werden:

f1 = 5.00 Hz:	1. Längsbiegung
f2 = 6.12 Hz:	2. Längsbiegung
f3 = 9.38 Hz:	1. Torsion
f4 = 12.38 Hz:	2. Torsion
f5 = 20.38 Hz:	1. Querbiegung
f6 = 22.63 Hz:	2. Querbiegung
f7 = 26.88 Hz:	3. Querbiegung
f8 = 39.63 Hz:	3. Torsion
f9 = 56.50 Hz:	4. Querbiegung
f10 = 63.25 Hz:	4. Torsion
f11 = 68.65 Hz:	5. Torsion plus Querbiegung
f12 = 75.75 Hz:	5. Querbiegung
f13 = 89.50 Hz:	6. Querbiegung
f14 = 98.00 Hz:	6. Torsion
f15 = 133.80 Hz:	7. Querbiegung, lokal

Die jeweils ersten formtypischen Eigenschwingungen der Brücke liegen demnach bei  $f_1 = 5.00 \text{ Hz}$  (Längsbiegung),  $f_3 = 9.38 \text{ Hz}$  (Torsion) und  $f_5 = 20.38 \text{ Hz}$  (Querbiegung). Die zugehörigen Eigenformen sind in den Abbildungen 8a bis 8c dargestellt.

Von den höherfrequenten Schwingungen, die frequenzmässig im Anregungsbereich der Walzen liegen, seien hier zwei Beispiele gezeigt (Abb. 8d und 8e). Im Gegensatz zu  $f_5$  ist die Querbewegung von  $f_9$  nicht von einer einfachen, knotenfreien Bewegung in vertikaler Richtung überlagert sondern von einer Bewegung, die einen Knoten aufweist (vgl. die Form der Längsachse der

Brücke). Die resultierende Schwingungsform ist aber immer noch deutlich einfacher als jene für  $f_{11}$ , wo sich Querbiege- und Torsionsanteile überlagern.

### Versuche während des Belagseinbaus: Versuchsprogramm

Dem Ablauf des Belagseinbaus folgend wurde für den Einbau der einen Spur die Automatikwalze AV 95 und für jenen der anderen Spur die konventionelle Walze CC 232 verwendet. Der Belagseinbau erfolgte in zwei Durchgängen: Zuerst wurde die HMT (Heissmischtragschicht) in beiden Spuren eingebaut, anschliessend die Deckschicht. Beide Vorgänge wurden in gleicher Art und Weise durchgeführt und messtechnisch erfasst.

Der verwendete Messpunktraster ist in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt. Die Walze AV 95 bewegte sich im Bereich der Achse A, Messpunkte MP 1 bis MP 4, die CC 232 im Bereich der Achse B, Punkte MP 5 bis MP 8 (Abb. 9 und 10).

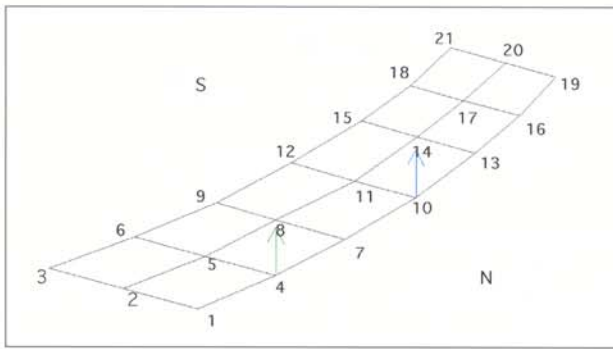
Für die Messungen wurden acht Beschleunigungsaufnehmer PCB 393A03 eingesetzt (Empfindlichkeit  $1 \text{ V/g}$ , Auflösung  $10^{-4} \text{ m/s}^2$ , Messbereich  $\pm 5 \text{ g}$ ). Diese erfassen die Beschleunigung in vertikaler Richtung. Die Aufnehmer wurden mit Siegelack aufgeklebt (Abb. 11).



6

6: Ein Beschleunigungsaufnehmer PCB 393B31.

6: Accéléromètre PCB 393B31.



**7** Messpunkttraster für die ambiente Modalanalyse. Blau: Referenzpunkt, grün: mobiler Messpunkt beim Messzyklus 1. In den Schnitten 7 bis 9 und 13 bis 15 sind die Stützen angeordnet.

**7:** Grille de points de mesure pour l'analyse modale ambiante. En bleu: point de référence; en vert: point de mesure mobile du cycle 1. Les piliers se situent dans les coupes 7 à 9 et 13 à 15.

Die technischen Parameter der Signalerfassung waren:  
 Abtastrate:  $s = 512 \text{ Hz}$   
 Obere Grenzfrequenz:  $f_c = 200 \text{ Hz}$

### Versuche während des Belageinbaus: maximale Schwingungsgrößen

Die folgenden maximalen Schwinggeschwindigkeiten wurden ermittelt:  
 AV 95: 12,2 mm/s (Einbau HMT) und 11,4 mm/s (Einbau Deckschicht)  
 CC 232/52 Hz: 14,0 mm/s (Einbau HMT)  
 CC 232/70 Hz: 9,7 mm/s (Einbau HMT), 11,1 mm/s (Einbau Deckschicht).

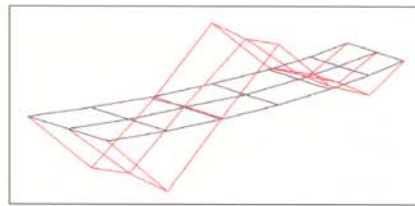
Die folgenden maximalen Beschleunigungen wurden ermittelt:  
 AV 95: 3,7 m/s<sup>2</sup> (Einbau HMT), 2,6 m/s<sup>2</sup> (Einbau Deckschicht)  
 CC 232/52 Hz: 3,3 m/s<sup>2</sup> (Einbau HMT)  
 CC 232/70 Hz: 2,6 m/s<sup>2</sup> (Einbau HMT), 3,8 m/s<sup>2</sup> (Einbau Deckschicht)

### Versuche während des Belageinbaus: Frequenzanalyse der Beschleunigungssignale

Während des Einbaus des Belages wurden insgesamt 27 Messsequenzen mit Längen zwischen 18 und 600 Sekunden gespeichert; 14 Sequenzen während des Einbaus der HMT, 13 während des Einbaus der Deckschicht. In der Folge werden die Resultate für einige charakteristische Sequenzen diskutiert.

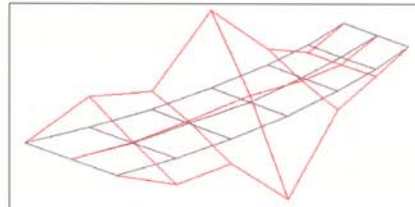
### Versuche während des Belageinbaus; Interaktion Walzen – Brücke

Alle nachfolgend diskutierten Frequenzspektren weisen eine Gemeinsamkeit auf: Der Frequenzinhalt der Brückenschwingungen wird von der (den) Grundfrequenz(en) der Walze sowie den zugehörigen Ober-



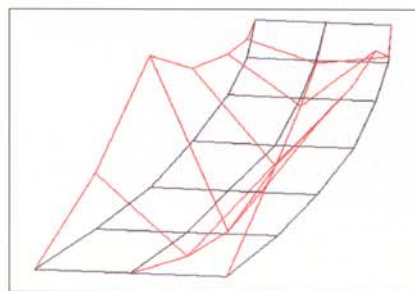
**8a:** Modale Form der Eigenschwingung  $f_1 = 5,00 \text{ Hz}$ , 1. Längsbiegung.  
**8a:** Forme modale de l'oscillation propre pour  $f_1 = 5,00 \text{ Hz}$ , en flexion longitudinale.

**8a**



**8b:** Modale Form der Eigenschwingung  $f_3 = 9,38 \text{ Hz}$ , 1. Torsion.  
**8b:** Forme modale de l'oscillation propre pour  $f_3 = 9,38 \text{ Hz}$ , en torsion.

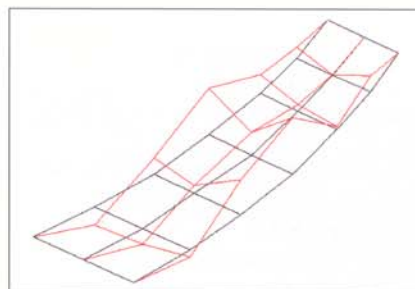
**8b**



**8c:** Modale Form der Eigenschwingung  $f_5 = 20,38 \text{ Hz}$ , 1. Querbiegung.

**8c:** Forme modale de l'oscillation propre pour  $f_5 = 20,38 \text{ Hz}$ , en flexion transversale.

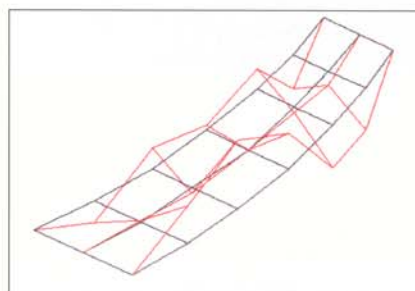
**8c**



**8d:** Modale Form der Eigenschwingung  $f_9 = 56,50 \text{ Hz}$ , 4. Querbiegung.

**8d:** Forme modale de l'oscillation propre pour  $f_9 = 56,50 \text{ Hz}$ , en flexion transversale.

**8d**



**8e:** Modale Form der Eigenschwingung  $f_{11} = 68,85 \text{ Hz}$ , 5. Torsion plus Querbiegung.

**8e:** Forme modale de l'oscillation propre pour  $f_{11} = 68,85 \text{ Hz}$ , en torsion plus flexion transversale.

**8e**

schwingungen dominiert. Zwar sind die Eigenfrequenzen der Brücke in allen untersuchten Spektren klar erkennbar, aber ihre spektrale Dichte liegt im Allgemeinen um mindestens 30 dB tiefer als jene der von den Walzen erzwungenen Schwingungen (Infolge der Massewirkung des eingebrachten Belages bzw. der für den Einbau verwendeten Fahrzeuge liegen diese Eigenfrequenzen bei etwas tieferen Werten als sie für die leere Brücke bestimmt wurden). Es sind keine Anzeichen einer Interaktion zwischen Walzen und Brücke erkennbar.

**Frequenzanalyse für die Walze AV 95**

Aus der Abbildung 12b gehen die Verhältnisse für die Walze AV 95 zu Beginn des Verdichtungsprozesses hervor: Zwischen  $f = 40.0$  Hz und  $f = 51.0$  Hz sind vier Spitzen im Spektrum vorhanden, eine weitere Spitze, auf die noch zurückzukommen sein wird, liegt bei  $f = 55.5$  Hz. Die ersten Harmonischen dieser Schwingungen sind problemlos zwischen  $f = 80$  Hz und  $f = 110.5$  Hz identifizierbar, die zweiten Harmonischen sind im Bereich  $f = 127.5...165.5$  Hz ebenfalls vorhanden.

Für die gleiche Walze, aber 13 Minuten später, sind die Resultate in der Abbildung 13 dargestellt: Die Einwirkung der Walze erfolgt nun im Wesentlichen mit  $f = 49.0$  Hz und  $f = 55.5$  Hz bzw. den zugehörigen Harmonischen.



9: Die Walze AV 95 beim Verdichten der Spur A (links).  
9: Le rouleau AV 95 compacte l'axe A (à gauche).



10: Die Walze CC 232 beim Verdichten der Spur B; links eine statische Walze beim Nachverdichten der Spur A.  
10: Le rouleau CC 232 compacte l'axe B; à gauche, un rouleau statique effectue un compactage additionnel de l'axe A.



11: Ein Beschleunigungsaufnehmer PCB 393A03.  
11: Accéléromètre PCB 393A03.

Wiederum 3 Minuten später lag die Einwirkung bei  $f = 51.0$  Hz bzw.  $f = 55.5$  Hz (Abb. 14).

**Frequenzanalyse für die Walze CC 232, mit 52 Hz einwirkend**

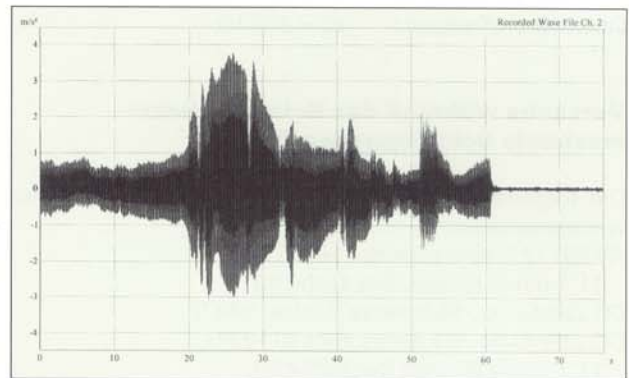
Die Einwirkung dieser Walze erfolgte primär mit  $f = 48.0$  Hz und den zugehörigen Harmonischen (Abb. 15).

**Frequenzanalyse für die Walze CC 232, mit 70 Hz einwirkend**

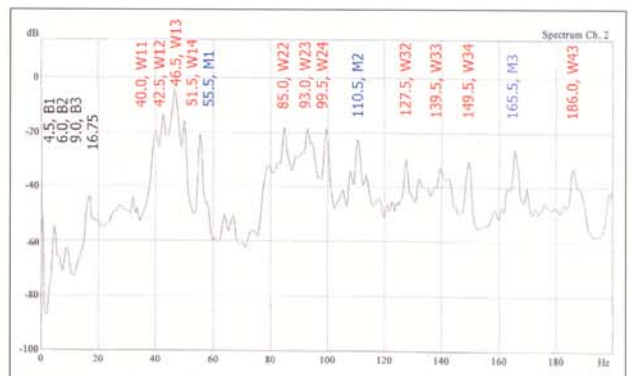
Die Einwirkung dieser Walze erfolgt ohne grössere Streuungen mit  $f = 66.0$  Hz bzw. den zugehörigen Harmonischen (Abb. 16). Wiederum sind eine zusätzliche Schwingung bei  $f = 55.5$  Hz und deren Harmonische festzustellen.

**Schwingungen mit  $f \approx 55$  Hz**

In einigen Spektren kann eine Schwingung mit  $f \approx 55$  Hz deutlich identifiziert werden. In einem ersten Anlauf wurde dafür die 9. Eigenschwingung der Brücke,  $f_9 = 56.5$  Hz verantwortlich gemacht. Eine genauere Untersuchung der Spektren ergab aber folgendes:



12a: Zeitsignal in MP 2 für die Walze AV 95 (ab  $t = 0$  min.).  
12a: Evolution du signal produit par le rouleau AV 95 au point de mesure MP 2 (début des mesures à  $t = 0$  min).



12b: Frequenzspektrum des in Abbildung 12a gezeigten Zeitsignales (ab  $t = 0$  min.). Schwarz: Eigenfrequenzen der Brücke, rot: Einwirkungsfrequenzen der Walze, blau: andere Maschineneinwirkung.  
12b: Spectre de fréquences du signal de la figure 12a (à  $t = 0$  min). En noir: fréquence propre du pont, en rouge: fréquences imposées par le rouleau; en bleu: effet accessoire.

Die Schwingung mit  $f \approx 55$  Hz tritt nie allein, sondern immer mit allen Harmonischen auf. Es kann sich deshalb nicht um eine Eigenschwingung der Brücke sondern nur um eine von einer Maschine, die rotierende Teile aufweist, erzwungene Schwingung handeln.

Diese Schwingung und ihre Harmonischen treten sowohl für die Fälle AV 95 als auch CC 232/70 Hz, nicht aber für den Fall CC 232/52 Hz auf.

Als mögliche Quelle für diese Schwingungen bietet sich der Dieselmotor der Walzen an. Allerdings würde dies bedeuten, dass die Motordrehzahl für beide Walzen im Bereich von 3300 U/min. liegen müsste (theoretische Werte vgl. Abb. 1).

### Resonanz beim Hochfahren der Walzen

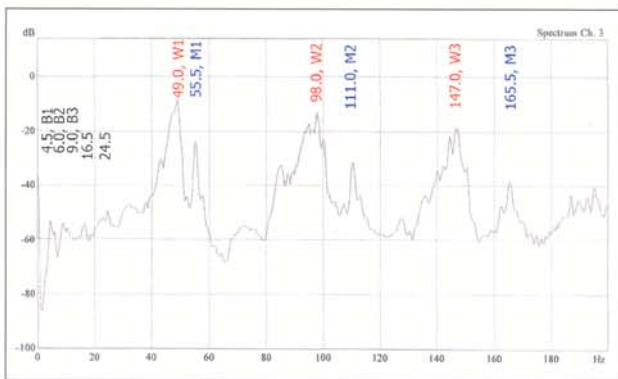
Es war von vorneherein klar, dass ein Resonanzzustand zwischen den Vibrowalzen und der mit ihrer Grundfrequenz schwingenden Brücke nicht auftreten kann. Die Frage war jedoch offen, inwiefern sich beim Hochfahren der Walzen vorübergehend ein solcher Zustand einstellen könnte. Eine entsprechende Untersuchung zeigt, dass während des Hochfahrens zwar die Amplitude der ausgeübten Kraft zunimmt, dass aber deren Frequenz im Rahmen der theoretischen Werte konstant bleibt.

In den Abbildungen 17a und 17b sind einerseits ein Ausschnitt von rund 2,5 s Länge aus dem in Abbildung 15a gezeigten Zeitsignal (CC 232/52 Hz) und andererseits das aus diesem kurzen Zeitfenster berechnete Frequenzspektrum dargestellt. Das Spektrum ist im Wesentlichen identisch mit dem in der Abbildung 15b für einen knapp 30 s langen Vorgang gezeigten Spektrum. Weder variiert die dominante Frequenz der Walzenkräfte beim Hochfahren, noch sind irgendwelche Anzeichen von Resonanz zwischen Walze und Brücke festzustellen.

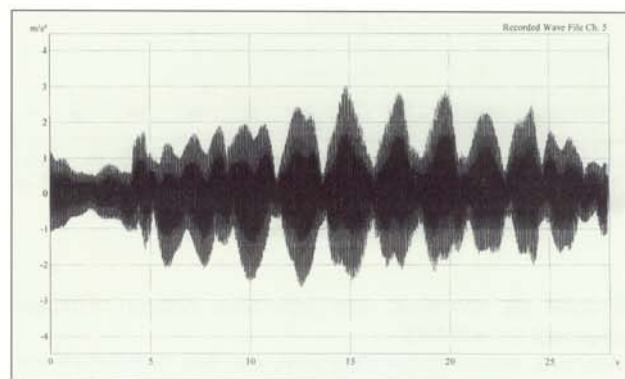
### Diskussion

Damit eine dynamische Interaktion zwischen Vibrowalzen und Brücke und entsprechende Resonanzeffekte auftreten könnten, müsste eine Einwirkfrequenz der Walzen und eine Eigenfrequenz der Brücke (während genügend langer Zeit) übereinstimmen. Zudem müsste die Form der Eigenschwingung der Brücke ähnlich aussehen, wie jene der die durch die Walze erzeugte statische Biegefläche.

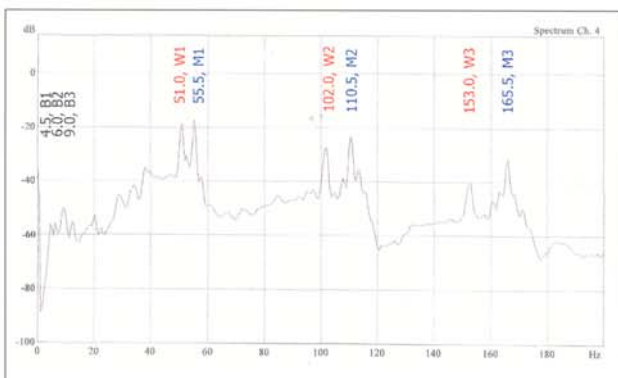
Die Frequenzen der formal geeigneten Eigenschwingungen der Brücke und jene der Walzen sind aber weit voneinander entfernt. Ebenso sind die Formen frequenzmässig geeigneter Eigenschwingungen der



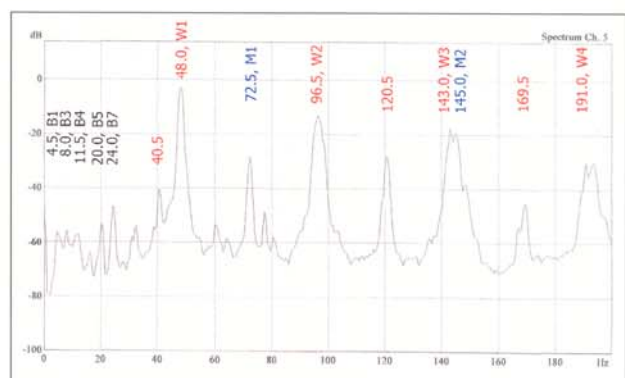
13: Frequenzspektrum für die Walze AV 95 in MP 3 (ab  $t = 13$  min.).  
 13: Spectre de fréquences du rouleau AV 95 au point de mesure MP 3 (à  $t = 13$  min.).



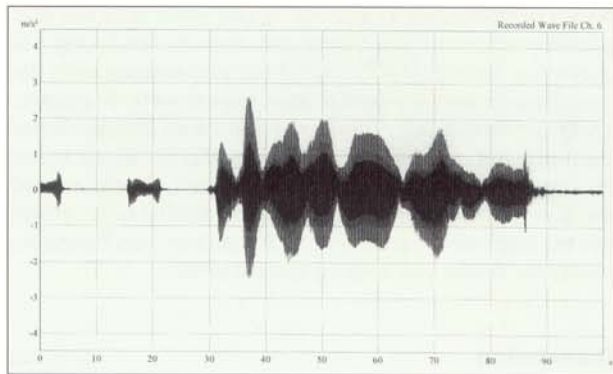
15a: Zeitsignal in MP 5 für die Walze CC 232 mit 52 Hz einwirkend.  
 15a: Evolution du signal produit par le rouleau CC 232 au point de mesure MP 5, avec une fréquence de vibration de 52 Hz.



14: Frequenzspektrum für die Walze AV 95 in MP 4 (ab  $t = 16$  min.).  
 14: Spectre de fréquences du rouleau AV 95 au point de mesure MP 4 (à  $t = 16$  min.).

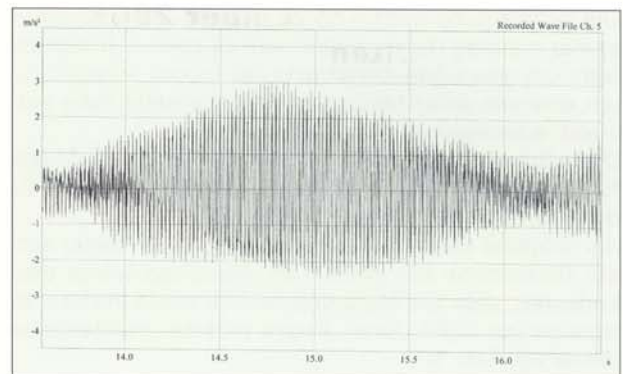


15b: Frequenzspektrum des in Abbildung 15a gezeigten Zeitsignals.  
 15b: Spectre de fréquences du signal de la figure 15a.



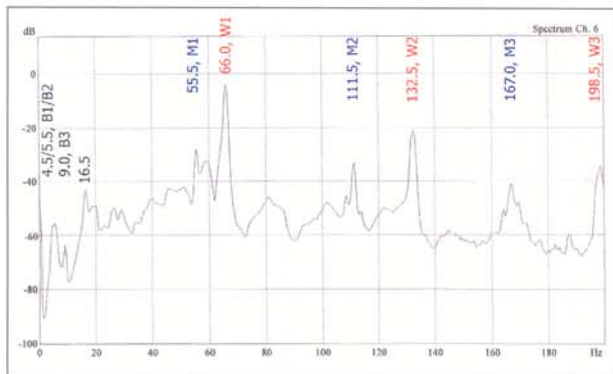
**16a** 16a: Zeitsignal in MP 6 für die Walze CC 232 mit 70 Hz einwirkend.

16a: Evolution du signal produit par le rouleau CC 232 au point de mesure MP 6, avec une fréquence de vibration de 70 Hz.



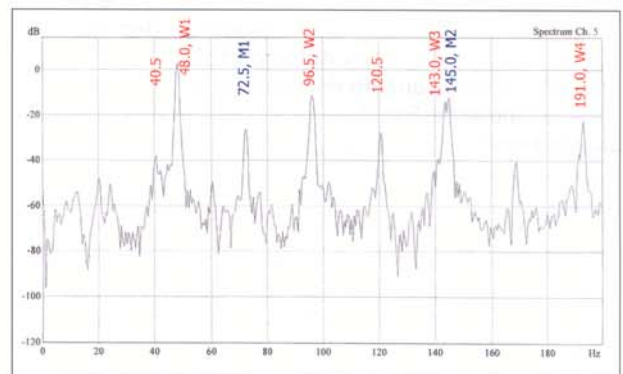
**17a** 17a: Ausschnitt aus dem in Abbildung 15a gezeigten Zeitsignal (CC 232 mit 52 Hz).

17a: Extrait du signal de la figure 15a (CC 232, 52 Hz).



**16b** 16b: Frequenzspektrum des in Abbildung 16a gezeigten Zeitsignals.

16b: Spectre de fréquences du signal de la figure 16a.



**17b** 17b: Frequenzspektrum des in Abbildung 17a gezeigten Zeitsignals.

17b: Spectre de fréquences du signal de la figure 17a.

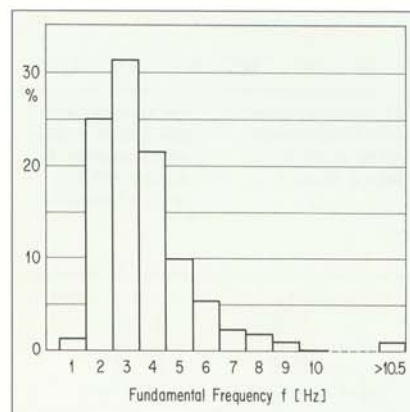
Brücke zu komplex, um von den Walzen effizient angeregt zu werden.

Weitere, wesentliche Faktoren, die das Entstehen von Resonanzzuständen verhindern sind,

- dass die Einwirkungsfrequenzen der Walzen einerseits planmässig (Automatikwalzen) und andererseits wohl infolge der Variabilität der federnden Wirkung des Belages auch unplanmässig nicht stabil sind,
- und dass auch die Eigenfrequenzen (und hier insbesondere die höheren Eigenfrequenzen) der Brücke infolge der Variabilität der Massewirkung des eingebrachten Belages und der für den Einbau verwendeten Fahrzeuge ebenfalls nicht stabil sind.

Es kann demnach als unwahrscheinlich bezeichnet werden, dass während des Einbaus eines Schwarzbelages unter Verwendung von Vibrowalzen kritische Resonanzzustände auftreten. Dies gilt sowohl für Automatikwalzen als auch für konventionelle Vibrowalzen. Nun stellt sich vielleicht die Frage, ob die Brücke A110 ein repräsentatives Objekt sei. Einerseits liegt die Grundfrequenz der Brücke mit  $f = 5.00$  Hz vergleichsweise hoch (Abb. 18). Andererseits weist die Brücke A110 durchaus Eigenfrequenzen im Bereich der Einwirkungsfrequenzen von Vibrowalzen auf. In diesem Sinn ist die Brücke A110 durchaus repräsentativ und liegt kaum auf der unsicheren Seite.

**18**



18: Histogramm der Grundfrequenz von 202 Stahl- und Spannbeton-Strassenbrücken in der Schweiz: Minimum: 1.23 Hz, Mittelwert: 3.66 Hz, Maximum: 14.0 Hz (aus [2]).  
18: Histogramme de la fréquence de base d'un échantillon de 202 ponts suisses en béton armé et précontraint. Minimum: 1,23 Hz, valeur moyenne: 3,66 Hz, maximum: 14,0 Hz (d'après [2]).

Obschon es keine Hinweise darauf gibt, dass wesentlich andere Ergebnisse resultieren könnten, ist es aber sicher angebracht, zur Erhärtung der hier präsentierten Resultate weitere Versuche durchzuführen. ■

**Literatur**

- [1] Erschütterungen, Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke. Norm SN 640 312a, herausgegeben von der VSS, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich, 1992.
- [2] Cantieni, R., Dynamic Load Tests on Highway Bridges in Switzerland – 60 Years Experience of EMPA. EMPA Report No. 211, 1983.