



Freie und Hansestadt  
Hamburg

Behörde für Stadtentwicklung und  
Umwelt

**igeh**

Inhaber: Frank Hammerle

# Ermittlung der Schwingungsempfindlichkeit einer Fußgängerbrücke

## Vergleich unterschiedlicher Lagerungstypen



Zürich, 09.06.2006

Elbchaussee 1  
22765 Hamburg  
tel. +49 / 40 / 59 45 07 86  
fax. +49 / 40 / 97 07 23 61

## 1 Einführung

Die neue Fussgängerbrücke über den Trog Sonnenweg in Hamburg, Bezirk Wandsbek, ist in Stahl-Bauweise erstellt worden. Bauherr ist die Freie und Hansestadt Hamburg. Die Stützweite beträgt 33,07 m. Das Ingenieurbüro igeh wurde beauftragt, das Schwingungsverhalten der Fussgängerbrücke zu messen.

## 2 Mess-System

Für die Erschütterungsmessungen wurde das Messgerät MR2002 von SYSCOM verwendet. Die wichtigsten Kenndaten finden sich in Tab. 2.1.

Aufnehmer:	Triaxiale Schwingbeschleunigungsaufnehmer
Abtastfrequenz:	400 Messwerte pro Sekunde
Frequenz:	1 bis 160 Hz
Amplitude:	0.003 bis 100 mm/s <sup>2</sup>

Tabelle 2.1

## 3 Messprogramm

Die Messungen wurden am 27.11.2005 und am 08.12.2005 durchgeführt. Das Messprogramm umfasste drei Anregungsarten:

- Impulsartige Anregung
- Hintergrund-Anregung (ambient vibration)
- Anregung durch Personen

In Tabelle 3.1 sind alle Messungen mit Angabe der Anregungs- und Messpunkte zusammengestellt.

Nr.	Anregung	Anregungspunkt	Messpunkt
<b>Impulsartige Anregung</b>			
1	Impulsartige Anregung Vertikal-Z	MP1	MP1-triax
<b>Hintergrund-Erschütterungen (ambient vibration)</b>			
2	Hintergrund-Erschütterungen	/	MP1-triax
<b>Anregung durch Personen</b>			
3	2 Personen gehen im Takt über die Brücke	verteilt	MP1-triax
4	5 Personen gehen im Takt über die Brücke	verteilt	MP1-triax
5	5 Personen gehen versetzt über die Brücke	verteilt	MP1-triax

Tabelle 3.1 Zusammenstellung der Messungen

Bilder 3.1 und 3.2 zeigen die neu erstellte Fußgängerbrücke über den Trog Sonnenweg



Bild 3.1 Schanzengrabenbrücke (Seitenansicht)



Bild 3.2 Schanzengrabenbrücke (Nahaufnahme)

Die folgenden Bilder zeigen den Grundriss, den Längsschnitt und den Querschnitt der Brücke mit der Lage des Messpunktes MP1. Die Lage des Messpunktes ist in Schnitt C-C in Gehwegmitte.

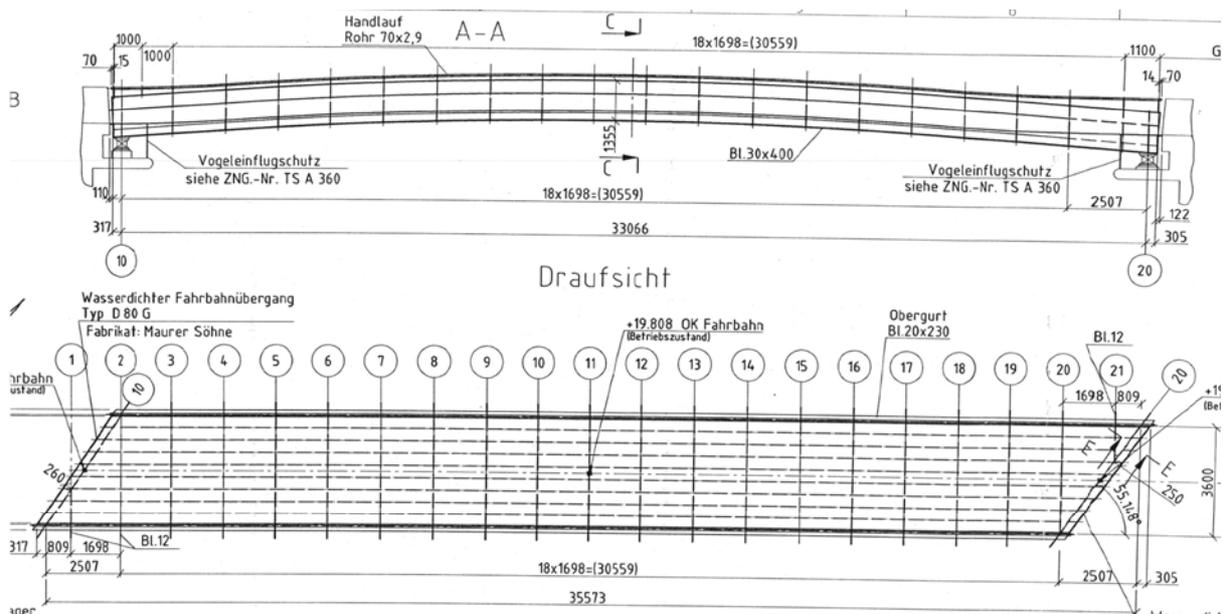


Bild 3.3 Grundriss und Längsschnitt der Brücke

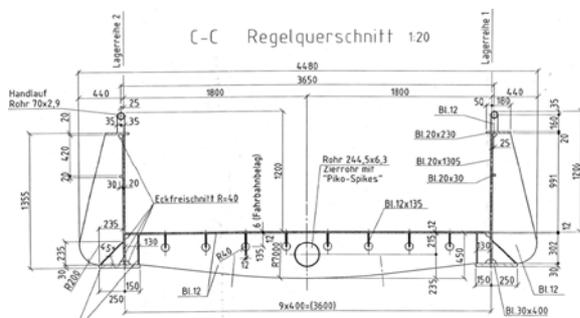
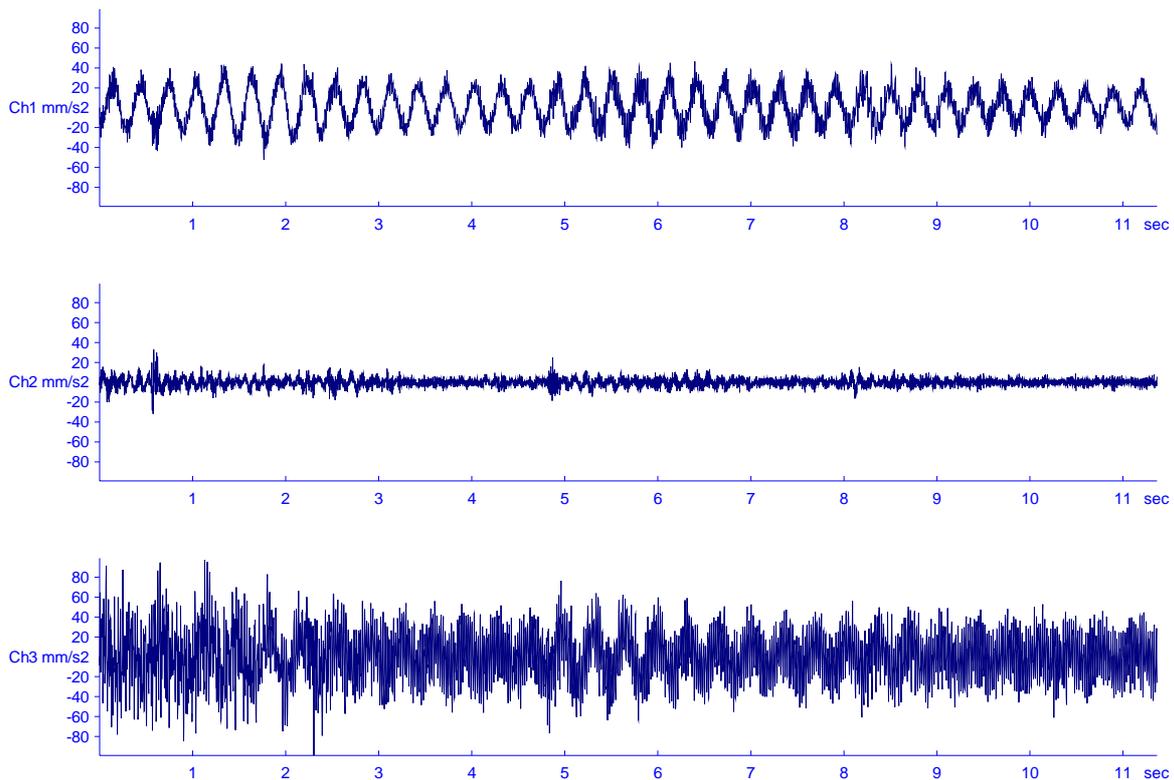


Bild 3.4 Querschnitt und Foto mit Messpunkt MP1

## 4 Hintergrund-Anregung

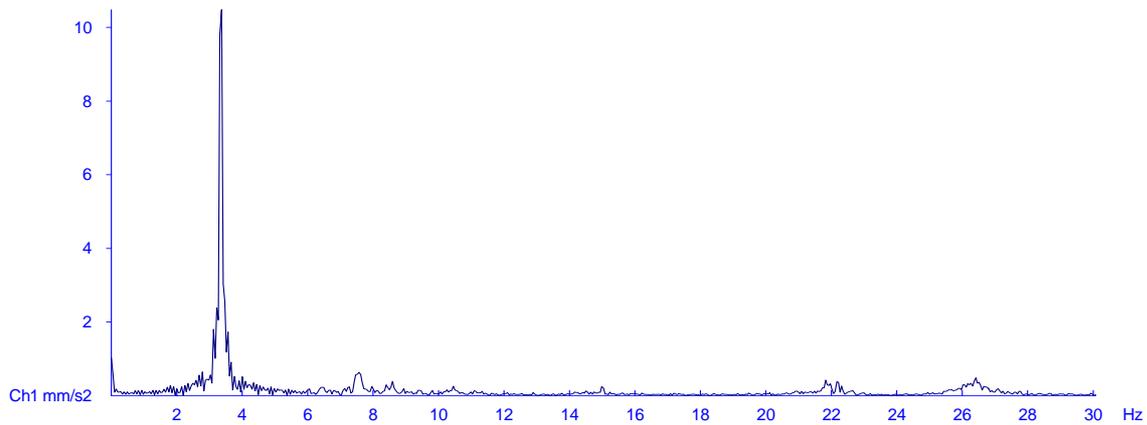
Bei der Hintergrund-Anregung (ambient vibration) werden die stets vorhandenen Schwingungen der Brücke ausgenutzt, um die Eigenfrequenzen zu bestimmen. Für die vorliegenden Auswertungen wurden mehrere Messungen mit einer Länge zwischen 10 und 35 Sekunden aufgezeichnet. Durch Mittelung der Amplitudenspektren (sog. Frequency enhancement) konnte ein klares Bild der Hauptfrequenzen gewonnen werden. Bild 4.1 zeigt ein typisches Beispiel einer Schwingungsaufzeichnung beim Messpunkt MP1 bei Hintergrundanregung.



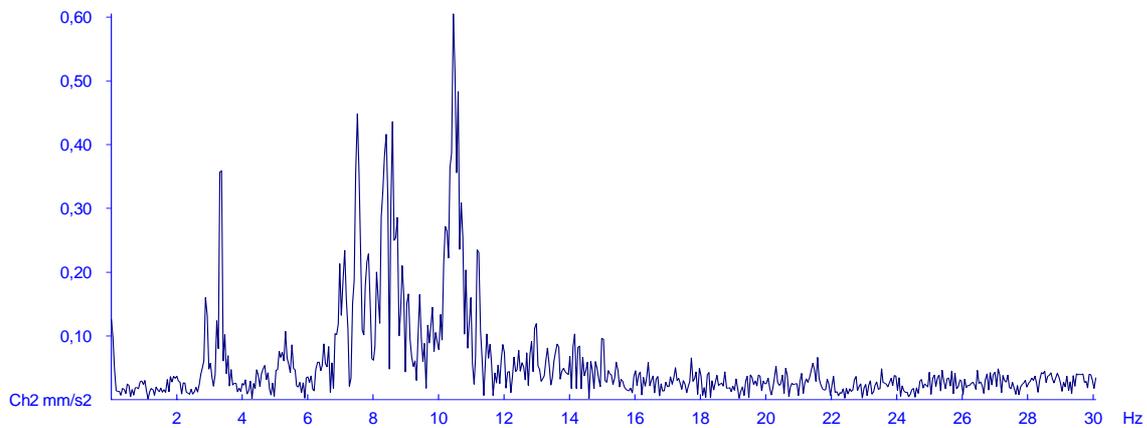
**Bild 4.1** Typisches Beispiel einer Schwingungsaufzeichnung bei Hintergrundanregung; oben: Horizontal-X; mitte: Horizontal-Y; unten: Vertikal-Z

Bild 4.2 zeigt die gemittelten Amplitudenspektren in den drei orthogonalen Richtungen für den Messpunkt MP1. In Brückenlängsrichtung (Y-Achse) erkennt man Frequenzspitzen bei 3,4 Hz und die erste Grundfrequenz bei 10,4 Hz. Die Spitze bei 3,4 Hz wird durch die Vertikalschwingung verursacht (Queraxen-Empfindlichkeit des Sensors). In Brückenquerichtung (X-Achse) erkennt man die erste Grundfrequenzen bei 3,4 Hz. In vertikaler Richtung (Z-Achse) ist die Grundfrequenz bei 2,9 Hz klar sichtbar. Eine zweite Eigenfrequenz ist bei 21,2 Hz erkennbar.

X-Wert (Brückenquerachse):



Y-Wert (Brückenlängsachse):



Z-Wert (Vertikalachse):

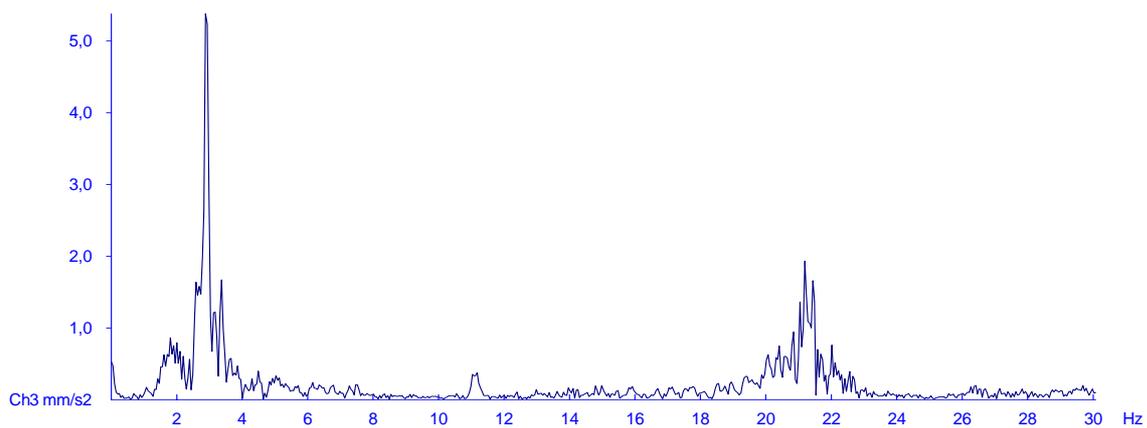


Bild 4.2 Amplitudenspektrum für MP1 aus „ambient vibration“

## 5 Anregung durch Personen

### 5.1 Anregung durch Gehen im Takt mit 2 Pers.

Die Bilder 5.1a bis 5.1c zeigen eine typische Messung der vertikalen Schwingungen beim Messpunkt MP1 verursacht durch zwei Personen, die im Gleichschritt über die Brücke gehen. Das Signal ist mit einem 10 Hz – Tiefpassfilter belegt. Die maximale Schwingung erreichte  $0.161 \text{ m/s}^2$  und  $0.72 \text{ mm/s}$ . Die Hauptfrequenz liegt bei  $3.05 \text{ Hz}$ , was der Schritt-  
 frequenz entspricht.

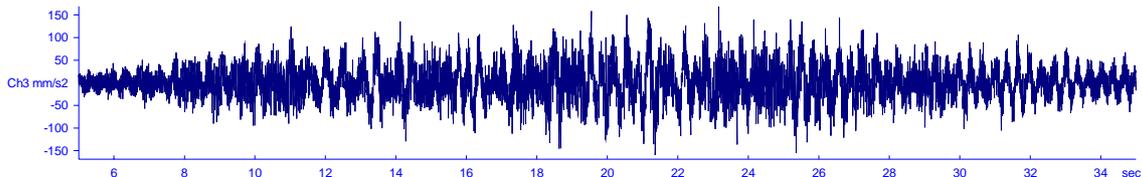


Bild 5.1a Beschleunigungsverlauf mit  $a_{\max} = 161 \text{ mm/s}^2$

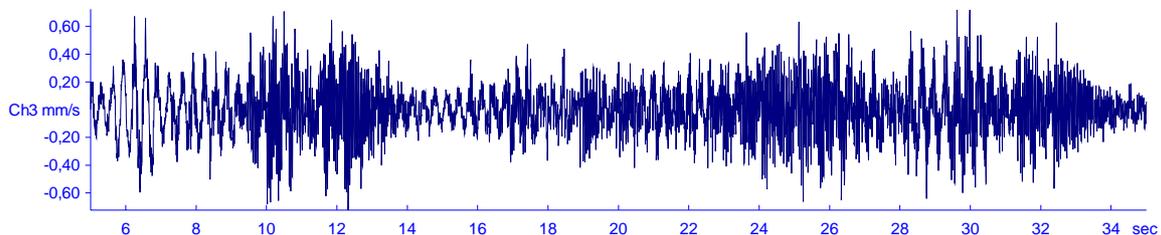


Bild 5.1b Geschwindigkeitsverlauf mit  $v_{\max} = 0.72 \text{ mm/s}$

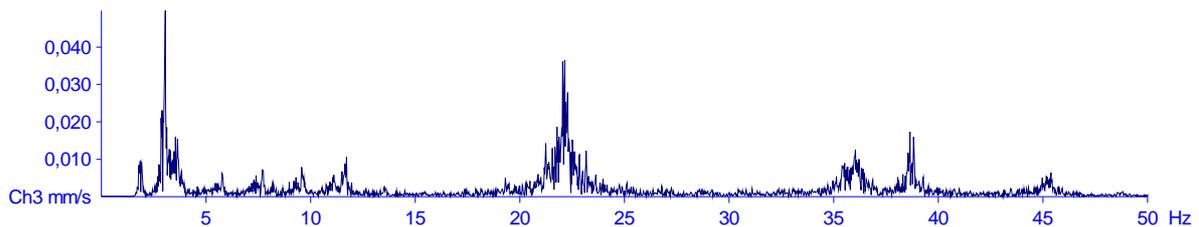


Bild 5.1c Amplitudenspektrum zu Bild 5.1b

### 5.2 Anregung durch Gehen im Takt mit 5 Pers.

#### Gruppe mit 5 Personen

Die Bilder 5.2a bis 5.2c zeigen eine typische Messung der vertikalen Schwingungen beim Messpunkt MP1 verursacht durch eine Gruppe von fünf Personen, welche die Brücke durch Gehen im Gleichschritt anregen. Das Signal ist mit einem 10 Hz – Tiefpassfilter belegt. Die maximale Schwingung erreichte  $1.865 \text{ m/s}^2$  und  $8.05 \text{ mm/s}$ . Ein Aufschaukeln in der Grundfrequenz von  $2.98 \text{ Hz}$  tritt nicht auf. Bei  $15 \text{ sec.}$  ist ein Abnehmen der Schwingung deutlich erkennbar. Die Dämpfung beträgt dabei  $0,6 \%$ .

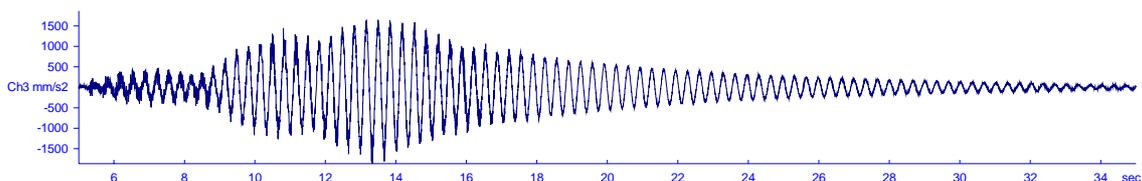


Bild 5.2a Beschleunigungsverlauf mit  $a_{\max} = 1865 \text{ mm/s}^2$

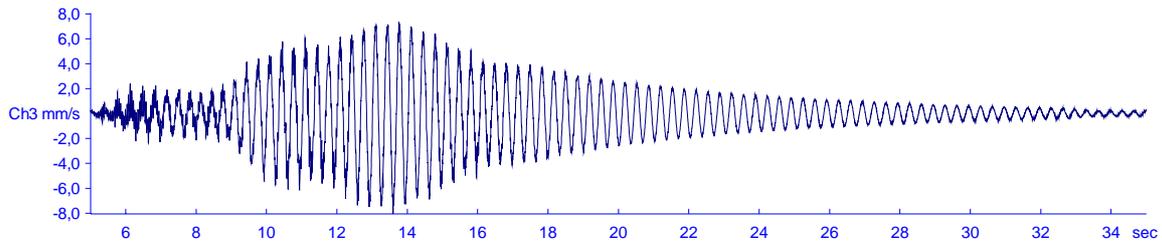


Bild 5.2b Geschwindigkeitsverlauf mit  $v_{\max} = 8.05 \text{ mm/s}$

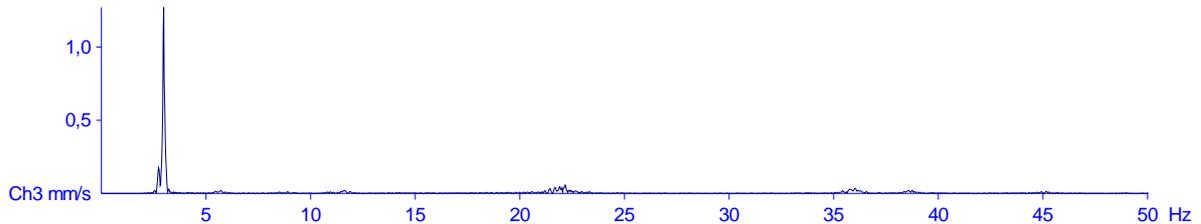


Bild 5.2c Amplitudenspektrum zu Bild 5.2b

Versetztes Gehen von 5 Personen

Die Bilder 5.2d bis 5.2f zeigen eine typische Messung der vertikalen Schwingungen beim Messpunkt MP1 verursacht durch fünf Personen, welche die Brücke durch Gehen anregen. Die Personen gehen nicht als Gruppe und nicht im Gleichschritt über die Brücke. Das Signal ist mit einem 10 Hz – Tiefpassfilter belegt. Die maximale Schwingung erreichte  $0.169 \text{ m/s}^2$ ,  $0.93 \text{ mm/s}$ . Ein Aufschaukeln in der Grundfrequenz von  $2.95 \text{ Hz}$  tritt nicht auf. Die Dämpfung ist nicht erkennbar und damit auch nicht ausweisbar bei diesem Frequenzspektrum.

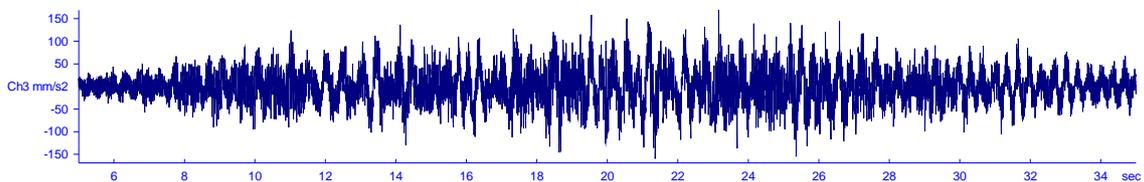


Bild 5.2d Beschleunigungsverlauf mit  $a_{\max} = 169 \text{ mm/s}^2$

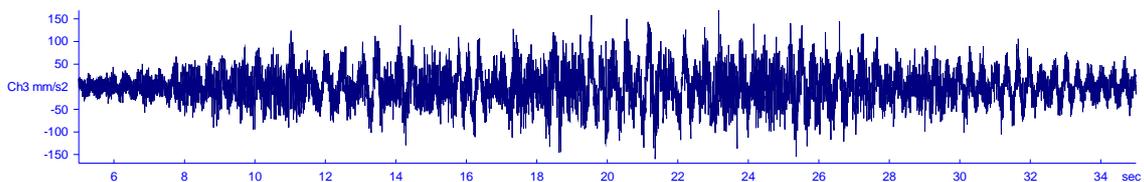


Bild 5.2e Geschwindigkeitsverlauf mit  $v_{\max} = 0.93 \text{ mm/s}$

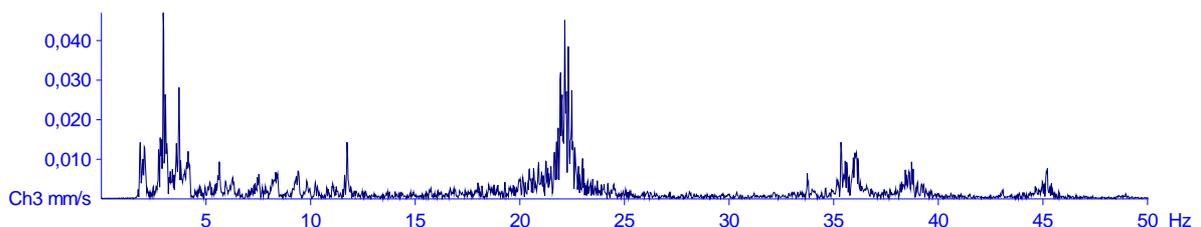


Bild 5.2f Amplitudenspektrum zu Bild 6.2e

Messpunkt	Anregung	$a_{\max}$ in $\text{mm/s}^2$	$v_{\max}$ in $\text{mm/s}$	Hauptfrequenz
MP1	Gehen; 2 Personen	161	0.72	3.05
MP1	Gehen; 5 Personen als Gruppe im Gleichtakt	1865	8.05	2.98
MP1	Gehen; 5 Personen versetzt	169	0.93	2.95

Tabelle 5.2 Zusammenfassung der Messungen mit Anregung durch Personen

## 6 Ermittlung der Eigenfrequenz und Dämpfung verschiedener Lagerungsarten

Zum Vergleich unterschiedlicher Lagerungstypen wird die Fußgängerbrücke impulsartig angeregt. Mit einem Auftritt der Fußsohle auf den Brückenbelag wurde die Eigenfrequenz der Fußgängerbrücke im Messpunkt MP1 für die vertikale Schwingung bestimmt.

### 6.1 Lagertypen

In Tabelle 6.1 werden verschiedene Lagertypen benannt. Die Lager der Zeilen 1.1 bis 1.8 entsprechen dem hier eingebauten Elastomerlager. Die Lager in den Zeilen 2.1 bis 6.2 können konstruktionsbedingt als nicht verformbar angesehen werden und entsprechen der hier zwischenzeitlichen Lagerungsart auf Pressen. Dies wäre jedoch an weiteren Versuchen zu prüfen. Die Lager nach Zeile 8.1 und 8.2 können je nach Bauart Relativbewegungen gleitend oder verformend aufnehmen.

Tabelle 1 — Gebräuchliche Lager

Nr	Kurzzeichen	Symbole in Lager-ebene	Symbole in der Ansicht		Lagerart	Relativbewegung						Kräfte (Hauptschnittgrößen)			Momente	
			x	y		Verschiebungen			Verdrehung			$F_x$	$F_y$	$N$		
						$v_x$ in x-Richtung	$v_y$ in y-Richtung	$v_z$ in z-Richtung	$\alpha_x$ um die x-Achse	$\alpha_y$ um die y-Achse	$\alpha_z$ um die z-Achse					
1.1	V2				Elastomerlager	verformend	verformend						$F_x$	$F_y$	$N$	
1.2	V1				Elastomerlager mit Festhaltekonstruktion für eine Achse <sup>a</sup>								$F_x$	$F_y$	$N$	
1.3	VG1				Elastomerlager mit einachsrig beweglichem Gleitteil und Festhaltekonstruktion für die andere Achse	gleitend und verformend	keine						$F_x$	$F_y$	$N$	
1.4	VG2				Elastomerlager mit zweiachsrig beweglichem Gleitteil	gleitend u. verformend					verformend <sup>a</sup>			$F_y$	$N$	
1.5	VGE2				Elastomerlager mit einachsrig beweglichem Gleitteil		verformend						$F_x$	$F_y$	$N$	
1.6	V; P				Elastomerlager mit Festhaltekonstruktion für zwei Achsen	keine	keine	geringe <sup>b</sup>	verformend	verformend			$F_x$	$F_y$	$N$	
1.7	P1				Elastomerlager mit einachsrig beweglichem Gleitteil und Festhaltekonstruktion für zwei Achsen	gleitend							$F_x$	$F_y$	$N$	
1.8	P2				Elastomerlager mit zweiachsrig beweglichem Gleitteil und Festhaltekonstruktion für zwei Achsen	gleitend								$F_y$	$N$	
2.1	P				Topflager	keine	keine	sehr kleine	gleitend	gleitend			$F_x$	$F_y$	$N$	
2.2	P1				Topflager mit einachsrig beweglichem Gleitteil	gleitend							$F_x$	$F_y$	$N$	
2.3	P2				Topflager mit zweiachsrig beweglichem Gleitteil	gleitend					gleitend <sup>a</sup>			$F_y$	$N$	

Tabelle 1 (fortgesetzt)

3.1	P			Kalottenlager mit Festhaltekonstruktion (Anreiferingsring)	keine	keine	nahezu keine	gleitend	gleitend		$V_x$	$V_y$	$N$			
3.2	P1			Kalottenlager mit einachsig beweglichem Gleitteil								$V_y$	$N$			
3.3	P2			Kalottenlager mit zweiachsig beweglichem Gleitteil		gleitend				gleitend <sup>a</sup>			$N$			
4.1	P			Stähleres Punktkipplager		keine	keine	kippend			$V_x$	$V_y$	$N$			
4.2	P1			Stähleres Punktkipplager mit einachsig beweglichem Gleitteil	gleitend							$V_y$	$N$			
4.3	P2			Stähleres Punktkipplager mit zweiachsigem beweglichem Gleitteil		gleitend			kippend				$N$			
5.1	L			Stähleres Linienkipplager	keine			keine			$V_x$	$V_y$	$N$	$M_x$		
5.2	L1			Stähleres Linienkipplager mit einachsig beweglichem Gleitteil		gleitend				keine		$V_y$	$N$	$M_x$		
5.3	L2			Stähleres Linienkipplager mit zweiachsig beweglichem Gleitteil		gleitend				gleitend			$N$	$M_x$		
6.1	L1			Einfaches Rollenlager		rollend		keine				$V_y$	$N$	$M_x$		
6.2	L2			Einfaches Rollenlager mit Gleitteil für die andere Richtung		gleitend				keine <sup>c</sup>	kippend		$V_x$	$V_y$	$N$	$M_x$
8.1	H			Festpunkt- oder Horizontalkraftlager zweiachsig fest	keine	keine	gleitend	gleitend oder verformend	gleitend oder verformend	gleitend oder verformend	$V_x$	$V_y$				
8.2	H1			Einachsig festes Führungslager	gleitend					keine		$V_x$				

Tabelle 6.1 Lagertypen nach Tabelle DIN 4141 Teil 1 (Vornorm, Mai 2003)

Grundsätzlich können Lager der Zeilen 2.1 bis 6.2 für alle Verschiebungen und Verdrehungen individuell hergestellt und eingebaut werden. Im Großbrückenbau kommen nahezu ausschließlich Topf- und Kalottenlager zum Einsatz. Speziell diese Lager sind in ihrem Unterhalt (geringere Lebensdauer) und in ihrer Anschaffung teurer als Verformungslager, Linien- oder Punktkipplager. Topf- und Kalottenlager werden zumeist speziell für dieses Bauwerk hergestellt.

Verformungslager hingegen haben ein enger definiertes Einsatzgebiet. Diese sind aber zu meist Lagerware. Gängige Lager können Verschiebungen bis ca.  $\pm 170$  mm und Verdrehungen bis ca. 0,039 rad aufnehmen. Im Gegensatz zu Topf- oder Kalottenlagern sind die Anschaffungskosten für Elastomerlager weitaus geringer.

## 6.2 Auflagerung auf Pressen und verformungsfreien Lager

Auch hier erfolgte die Schwingungsanregung impulsartig. Zum Vergleich der verschiedenen Lagerungsarten wurde nach Einhub der Brücke und vor Herstellen der endgültigen Lagerpunkte (Elastomerlager) die Dämpfung und die Eigenfrequenz bestimmt. Dabei war die Fußgängerbrücke auf festgestellten Pressen gelagert.

Verschiedene verformungsfreier Lager, wie z. B. Kalottenlager, Neo-Topf-Lager, Linienkipplager usw., die keinen verformbaren Baustoff als Grundlage der Verschieblichkeit besitzen, können in ihrer Verformbarkeit als der Presse gleichwertig angesehen werden.

Das nachfolgende Bild zeigt die provisorische Lagerung der Fußgängerbrücke auf den Stempeln neben den zu einem späteren Zeitpunkt eingebauten Elastomerlagern (hier durch Folie geschützt).



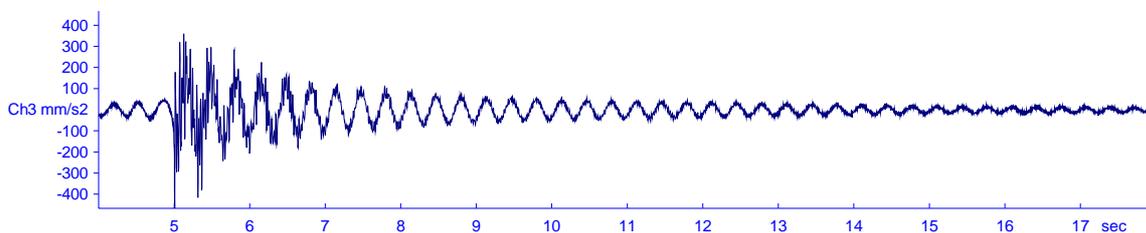
**Bid 6.1** Provisorische Auflagerung auf Stempel

Bei der Ermittlung der Eigenfrequenz konnte bei gleicher Versuchsanordnung und Witterungsbedingungen gegenüber dem Endzustand im Rahmen von Messungenauigkeiten kein Unterschied ermittelt werden. Die Eigenfrequenz konnte mit Werten zwischen 2,8 und 3,1 Hz bestimmt werden.

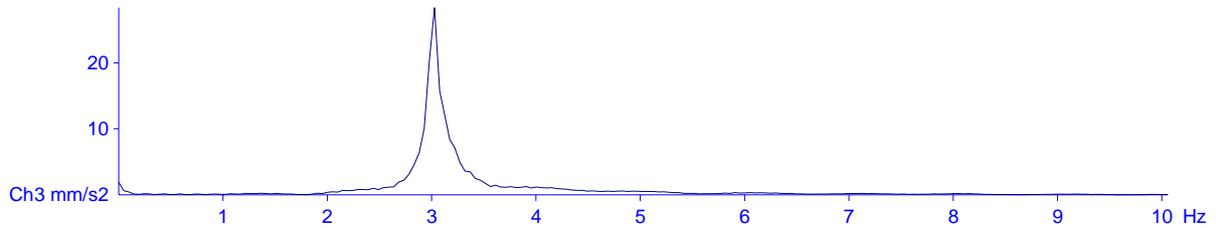
Die gemessenen Werte bei der Dämpfung liegen bei 0,1 bis 0,2 %. Auf Grund eines Datenverlustes können diese Messergebnisse nicht dargestellt werden.

### 6.3 Auflagerung auf Verformungslager (Elastomerlager)

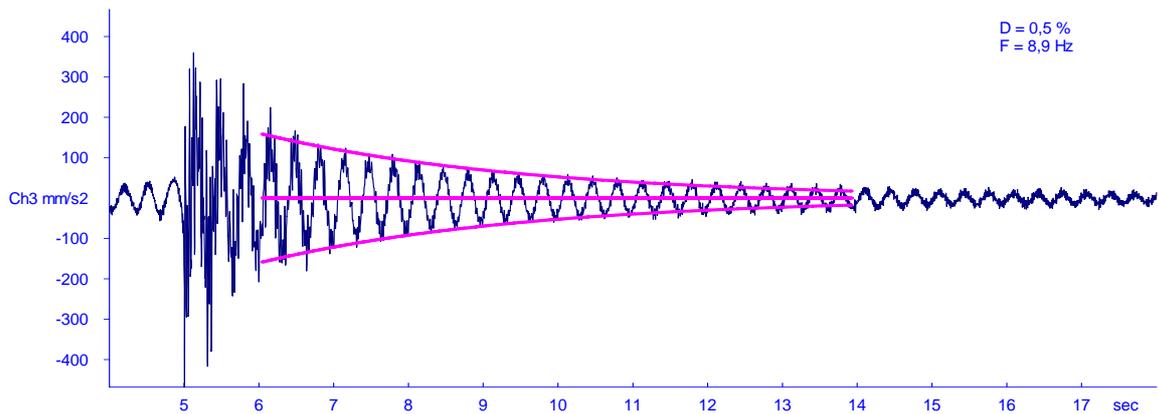
Mit Hilfe der vorgenannten Meßanordnung konnten nachfolgende Ergebnisse gewonnen werden. Bild 4.1 zeigt die Schwingungskurve.



**Bild 6.2** Schwingungskurve in Punkt für MP1; vertikale Richtung



**Bild 6.3** Bestimmung der Eigenfrequenz mit Hilfe des „Amplituden-Spektrums“; vertikale Richtung



**Bild 6.4** Bestimmung der Dämpfung; vertikale Richtung

Die Grundfrequenz liegt bei 3,0 Hz. Der Dämpfungswert konnte mit 0,5 % ermittelt werden.

Das nachfolgend dargestellte Lager ist ein allseitig verschiebliches Elastomerlager kurz vor dem Einbau. Es sind hier die Montageschrauben zu erkennen, die die obere und untere Lagerplatte miteinander verbinden. Diese werden nach dem Einbau im Überbau und Lagersockel gelöst.



**Bild 6.5** Allseitig verschiebliches Elastomerlager

## 7 Zusammenfassung

Die Messungen der Eigenfrequenzen und der Dämpfung ergeben für die unbelastete Brücke folgendes:

- Die vertikale Grundfrequenz liegt bei 3.0 Hz. Unabhängig von der Lagerungsart.
- Die Dämpfung im Endzustand liegt bei 0.5 % (Verformungslager)
- Die Dämpfung während des Bauzustandes lag bei 0.2 % (Lagerung auf Presse)
- Es ist festzustellen, dass die Gebrauchstauglichkeit der Fußgängerbrücke gegeben ist. Der „Komfort“ der Brücke leidet im Einzelfall, wenn eine Gruppe von Personen die Brücke im Gleichschritt überquert und eine einzelne Person sich ruhend in Brückenmitte aufhält.

Abschliessend sei noch darauf hingewiesen, dass die Messungen bei leerer Brücke durchgeführt worden sind. Bei voller Belastung wird die Eigenfrequenz der Brücke tiefer liegen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei Belastung ein Aufschaukeln durch mutwillige Anregung möglich ist. Des Weiteren sind die „Komforteigenschaften“ durch die gemessenen Bewegungen eingeschränkt.

Auf Grundlage dieser Beobachtung könnte es für die Anordnung von Schwingungstilgern entscheidend sein, welcher Lagertyp verwendet wird. In dem hier vorgestellten Fall konnte auf den Einbau von Schwingungstilgern verzichtet werden.

Es wäre jetzt zu untersuchen, ob sich meine Annahme bezüglich der Gleichwertigkeit der Dämpfung zwischen Pressen und verformungsfreien Lagern (Topflager, Kalottenlager, Kipplager und Rollenlager) tatsächlich einstellt. Außerdem sollten weitere Vergleichsmessungen an Brücken mit Verformungslagern während des Bauzustandes (Pressen als Auflagepunkte) und dem Endzustand (Verformungslager) durchgeführt werden.