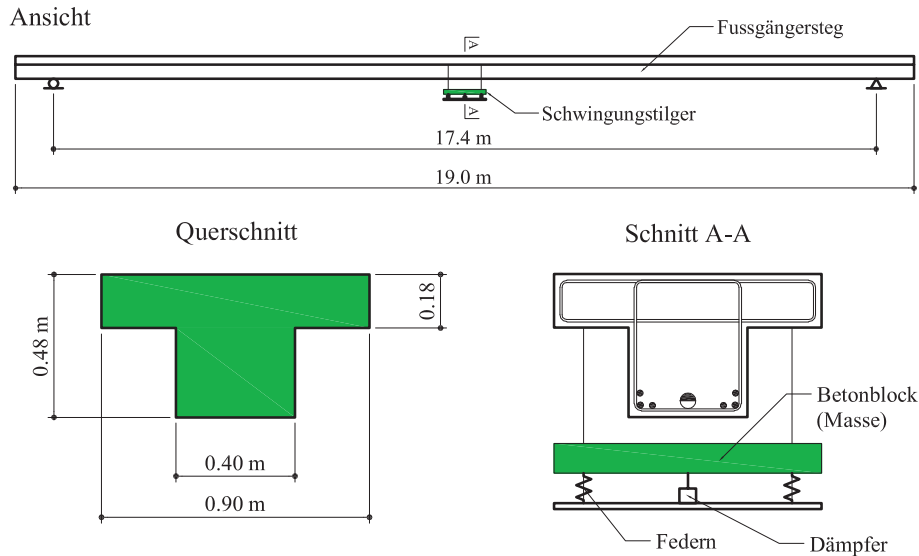


## 8 Fussgängersteg mit Tilger (DEMO)

### 8.1 Versuchskörper und Instrumentierung

Der Versuchskörper ist ein vorgespannter Stahlbetonbalken. Der Balken ist mit Leichtbeton gebaut und die Vorspannung ist ohne Verbund. Die Abmessungen wurden so gewählt, dass der Balken besonders anfällig für Fussgänger-induzierte Schwingungen ist. In Stegmitte ist ein Schwingungstilger angebracht.



Am Versuchskörper werden folgende Größen gemessen:

- Verschiebung in Stegmitte
- Beschleunigung in Stegmitte
- Beschleunigung im Viertelpunkt des Stegs



Bild 8.1: Ansicht der Versuchseinrichtung bei einem ausnahmsweise statischen Versuch.

- Aufbau des Tilgers

Ein Detail des Tilgers ist im Bild 8.2 dargestellt. Zu sehen sind:

- Die 4 Federn, die die Steifigkeit  $K_T$  des Tilgers sicherstellen
- Die 4 viskose Dämpfer, die die Dämpfungskonstante  $c_{opt}$  des Tilgers sicherstellen
- Die Masse  $M_T$ , die durch ein Betonblock und zwei Seitentaschen gefüllt mit Bleikugeln sichergestellt ist. Die Bleikugeln dienen zur Feinjustierung des Tilgers.

Die Eigenschaften des Tilgers sind im Abschnitt 8.2 angegeben.



Bild 8.2: Detailabbildung des Tilgers.

## 8.2 Parameter

### 8.2.1 Steg (Gerechnet, ohne Tilgermasse)

Modale Masse:  $M_H = 5300\text{kg}$

Modale Steifigkeit:  $K_H = 861\text{kN/m}$

Eigenfrequenz:  $f_H = 2.03\text{Hz}$

(Gerechnet mit Tilgermasse:  $f = 1.97\text{Hz}$ )

### 8.2.2 Tilger (Gerechnet)

Masse:  $M_T = 310\text{kg}$

Massenverhältnis:  $\mu = \frac{M_T}{M_H} = 0.0585 = 5.85\%$

Eigenfrequenz:  $f_{opt} = \frac{f_H}{1 + \mu} = 1.92\text{Hz}$

(Gemessen:  $f_T = 1.91\text{Hz}$ )

Steifigkeit:  $K_T = M_T \cdot (2\pi f_{opt})^2 = 50.9\text{kN/m}$

Dämpfungsrate:  $\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)^3}} = 0.14 = 14\%$

(Gemessen:  $\zeta_T = 13\%$ )

Dämpfungskonstante:  $c_{opt} = 2\zeta_{opt}\sqrt{K_T M_T} = 1.18\text{kNs/m}$

### 8.3 Versuchsprogramm

Im Laufe der Demonstration werden folgende Versuche durchgeführt:

Nr.	Versuch	Ort der Anregung	Tilger
1	Ausschwingen	Mitte	Blockiert
2	Sandsack	Mitte	Blockiert
3	Sandsack	Viertelpunkt	Blockiert
4	Sandsack	Mitte	Frei
5	Gehen 1 Person 3Hz	Entlang des Stegs	Blockiert
6	Gehen 1 Person 2Hz	Entlang des Stegs	Blockiert
7	Gehen 1 Person 2Hz	Entlang des Stegs	Frei
8	Gehen Gruppe 2Hz	Entlang des Stegs	Blockiert
9	Gehen Gruppe 2Hz	Entlang des Stegs	Frei
10	Hüpfen 1 Person 2Hz	Mitte	Blockiert
11	Hüpfen 1 Person 2Hz	Mitte	Frei

Typische Ergebnisse der Versuche werden in den nächsten Abschnitten dargestellt und kurz kommentiert. Es ist dabei zu bemerken, dass einige der dargestellten Versuchsergebnisse aus früheren Semestern stammen.

### 8.4 Ausschwingversuch mit blockiertem Tilger

#### Zeitverlauf der Verschiebung in Stegmitte

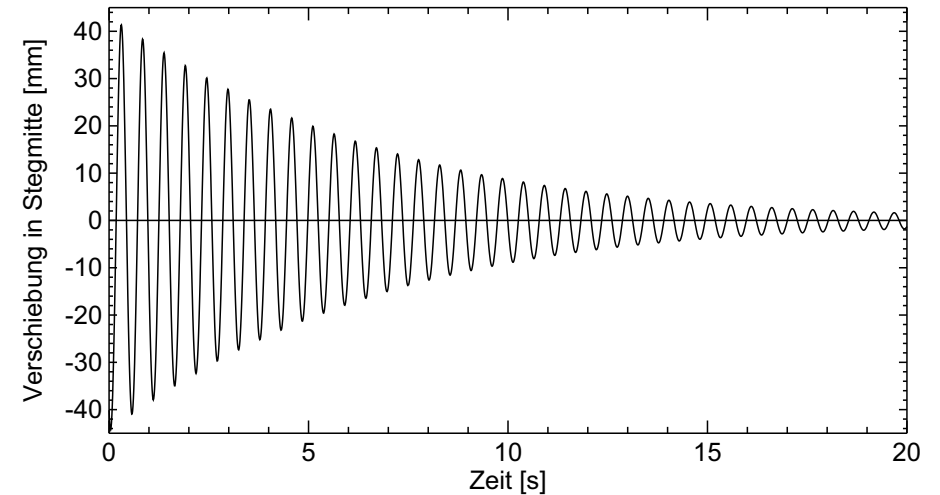


Bild 8.3: Ausschwingversuch mit blockiertem Tilger: Verschiebung in Stegmitte.

Auswertung:

	Logarithmisches Dekrement	Dämpfungsrate
Bereich 1 Mittlere Ampl.: ~30mm	$\delta = \frac{1}{8} \ln \frac{41.36}{21.66} = 0.081$	$\zeta_H = \frac{0.081}{2\pi} = 1.29\%$
Bereich 2 Mittlere Ampl.: ~14mm	$\delta = \frac{1}{8} \ln \frac{19.91}{9.68} = 0.090$	$\zeta_H = \frac{0.090}{2\pi} = 1.43\%$
Bereich 3 Mittlere Ampl.: ~6mm	$\delta = \frac{1}{8} \ln \frac{8.13}{3.90} = 0.092$	$\zeta_H = \frac{0.092}{2\pi} = 1.46\%$

## Fourier-Spektrum der Verschiebung in Stegmitte

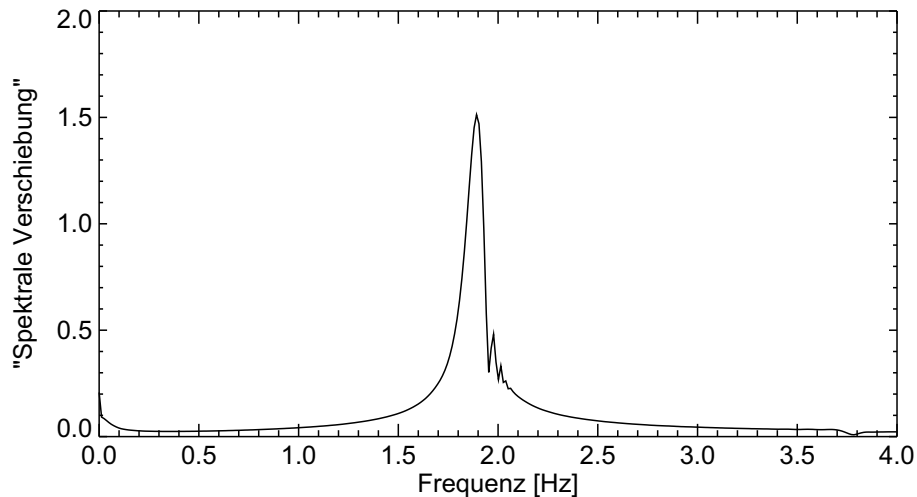


Bild 8.4: Ausschwingversuch mit blockiertem Tilger: Fourier-Spektrum der Verschiebung in Stegmitte.

Die gemessene Frequenz des Stegs mit blockiertem Tilger beträgt:

$$f = 1.89\text{Hz} \quad (8.1)$$

Dieser Wert ist kleiner als der Wert von Abschnitt 8.2.1. Dies ist mit der grossen Schwingungsamplitude am Anfang des Versuchs zu erklären, welche die Öffnung von Rissen im Steg und damit eine kleinere Steifigkeit verursacht hat.

Die zweite Spitze im Spektrum liegt bei  $f = 1.98\text{Hz}$ , was in guter Übereinstimmung mit Abschnitt 8.2.1 ist.

## 8.5 Sandsackversuch

Beim Sandsackversuch wird ein 20 kg schwerer Sandsack am Kran aufgehängt, 1 Meter über dem Steg positioniert, auf den Steg fallen gelassen und die Antwort des Systems gemessen.

Um die verschiedenen Eigenschwingungen des Systems anzuregen, wird der Sandsack während mehrerer Versuchen an unterschiedlichen Orten entlang des Stegs fallen gelassen, und zwar:

- in Stegmitte (Abschnitt 8.5.1)
- im Viertelpunkt des Stegs (Abschnitt 8.5.2).

Diese Versuche werden mit blockiertem Tilger durchgeführt. Um den Effekt des Tilgers auf die Schwingungen des Systems zu untersuchen wird der Versuch von Abschnitt 8.5.1 mit freiem Tilger wiederholt (Abschnitt 8.5.3).

### Bemerkung

- Die Resultate, die in Abschnitt 8.5.1 präsentiert sind, stammen aus den Versuchen im Herbstsemester 2009, während die Resultate, die in den Abschnitten 8.5.2 und 8.5.3 präsentiert sind, aus den Versuchen im Herbstsemester 2008 stammen. Leichte Unterschiede beim Aufbau der Versuchseinrichtung (Auflager) können zu leicht unterschiedlichen Eigenschwingungen des Systems geführt haben.

### 8.5.1 Blockierter Tilger, Anregung in Stegmitte

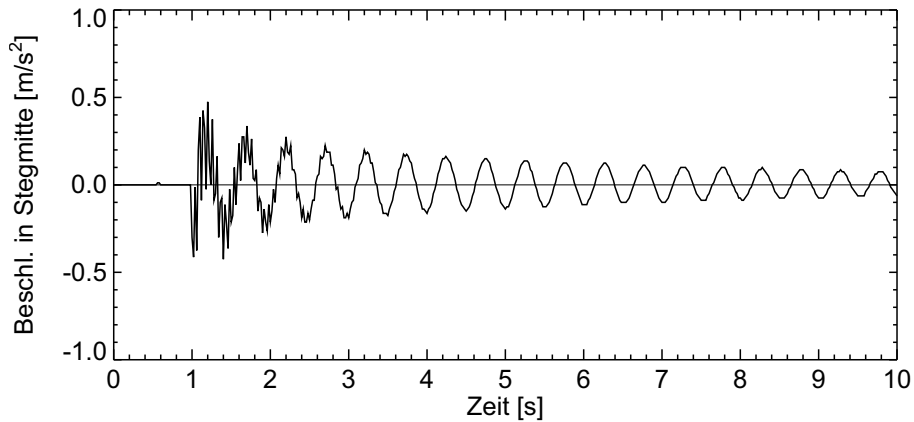


Bild 8.5: Sandsackversuch mit blockiertem Tilger: Beschleunigung in Stegmitte.

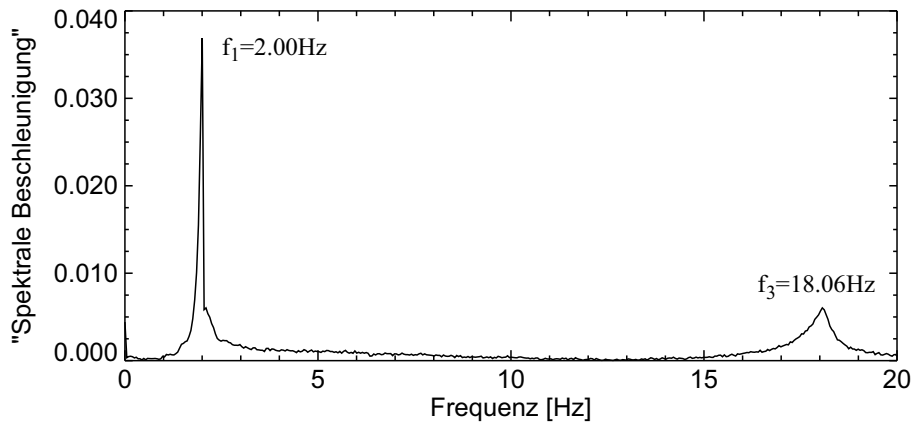


Bild 8.6: Sandsackversuch mit blockiertem Tilger: Fourier-Spektrum der Beschleunigung in Stegmitte.

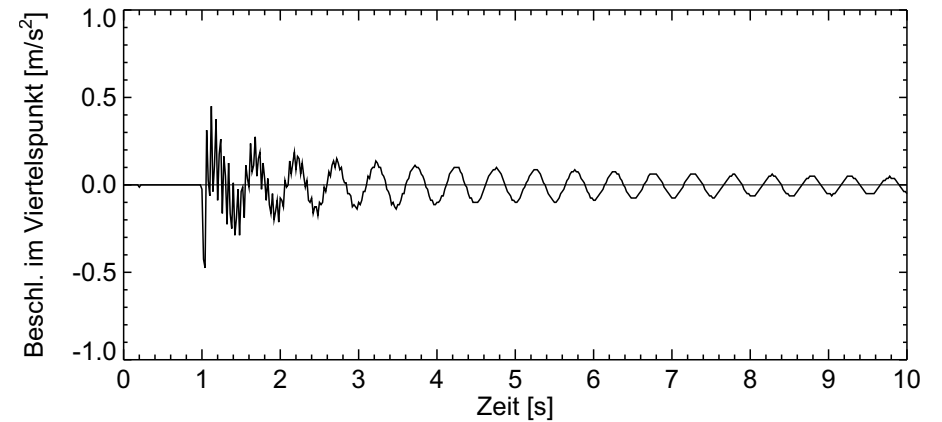


Bild 8.7: Sandsackversuch mit blockiertem Tilger: Beschleunigung im Viertelpunkt.

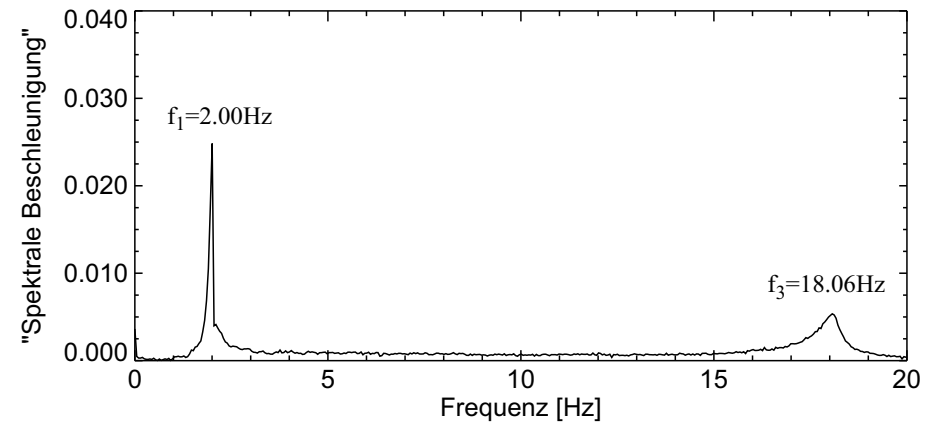


Bild 8.8: Sandsackversuch mit blockiertem Tilger: Fourier-Spektrum der Beschleunigung im Viertelpunkt.

## Bemerkungen

- Mit dem Sandsackversuch können grundsätzlich alle Frequenzen angeregt. Bilder 8.5 und 8.7 zeigen eine hochfrequente Schwingung, die einer Grundschwingung überlagert ist.
- Das Fourier-Amplituden-Spektrum zeigt markante Spitzen bei der ersten und dritten Eigenfrequenz des Systems (Steg mit blockiertem Tilger).
- Die zweite Eigenschwingung des Systems wird nicht angeregt, weil der Sandsack in einem Knoten des zweiten Eigenvektors auf den Steg auftrifft.
- In Stegmitte ist die Amplitude der Schwingung infolge der ersten Eigenschwingung grösser als im Viertelpunkt. Die Amplitude der Schwingung infolge der dritten Eigenschwingung ist hingegen an beiden Orten etwa gleich. Dies ist zu erwarten, wenn die Form des ersten und des dritten Eigenvektors betrachtet wird.
- Die Amplitude der Schwingung ist relativ klein, deshalb ist die gemessene erste Eigenfrequenz  $f_1 = 2.0\text{Hz}$  in guter Übereinstimmung mit Abschnitt 8.2.1.

## 8.5.2 Blockierter Tilger, Anregung im Viertelpunkt

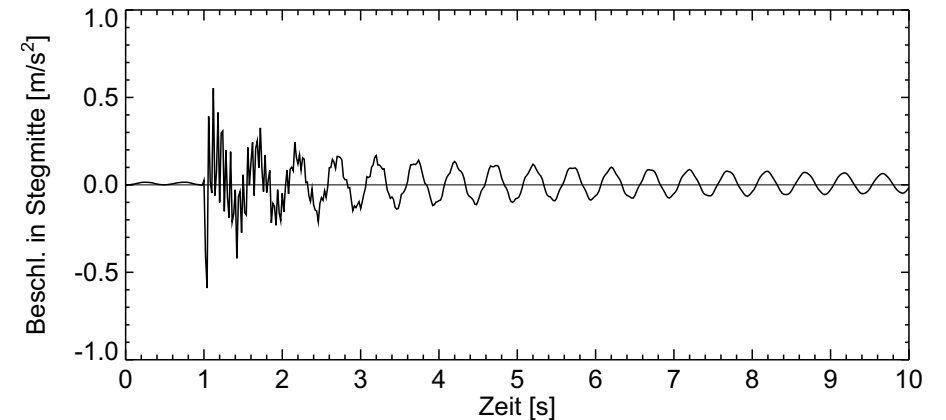


Bild 8.9: Sandsackversuch mit blockiertem Tilger: Beschleunigung in Stegmitte.

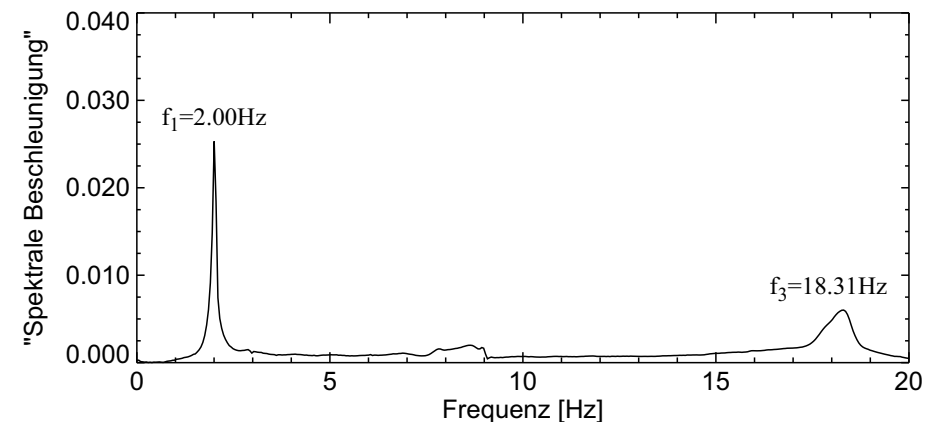


Bild 8.10: Sandsackversuch mit blockiertem Tilger: Fourier-Spektrum der Beschleunigung in Stegmitte.

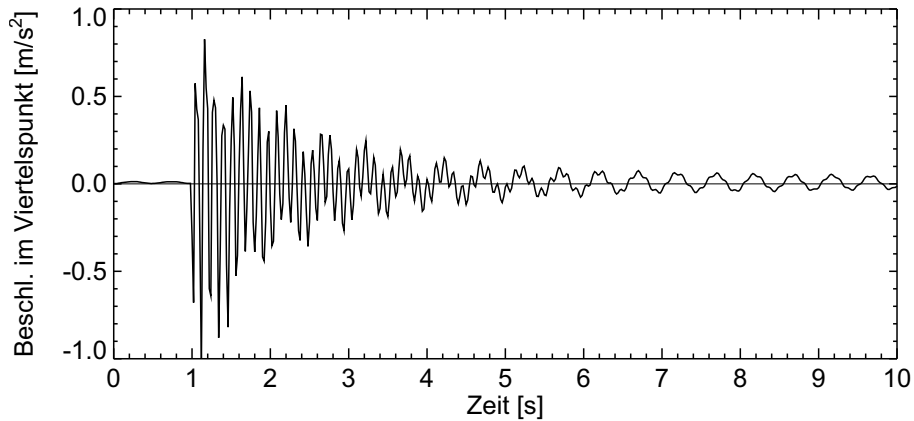


Bild 8.11: Sandsackversuch mit blockiertem Tilger: Beschleunigung im Viertelpunkt.

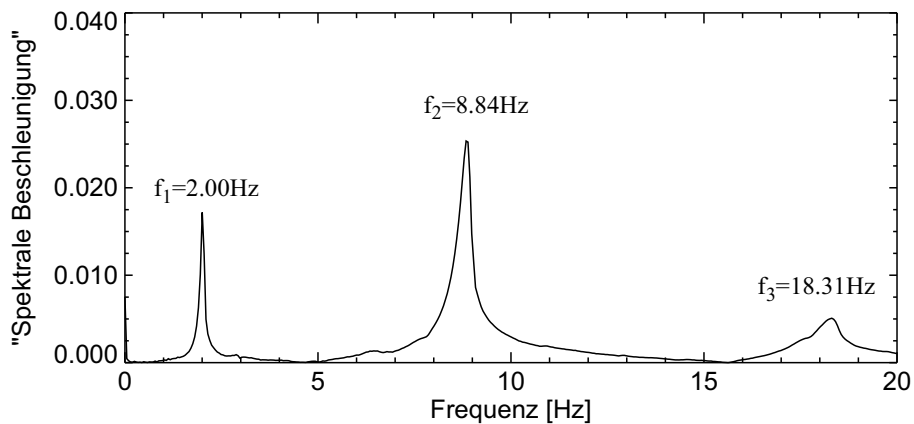


Bild 8.12: Sandsackversuch mit blockiertem Tilger: Fourier-Spektrum der Beschleunigung im Viertelpunkt.

## Bemerkungen

- Wenn der Sandsack im Viertelpunkt des Stegs auftrifft, wird die zweite Eigenschwingung des Systems stark angeregt. Ihr Beitrag zur gesamten Schwingung im Viertelpunkt des Stegs ist in den Bildern 8.11 und 8.12 sehr deutlich zu sehen.
- Der Beschleunigungsgeber in Stegmitte liegt theoretisch im Knoten der zweiten Eingenform und wie erwartet ist die Auswirkung der zweiten Eigenschwingung in den Bildern 8.9 und 8.10 verschwindend klein.

### 8.5.3 Freier Tilger, Anregung in Stegmitte

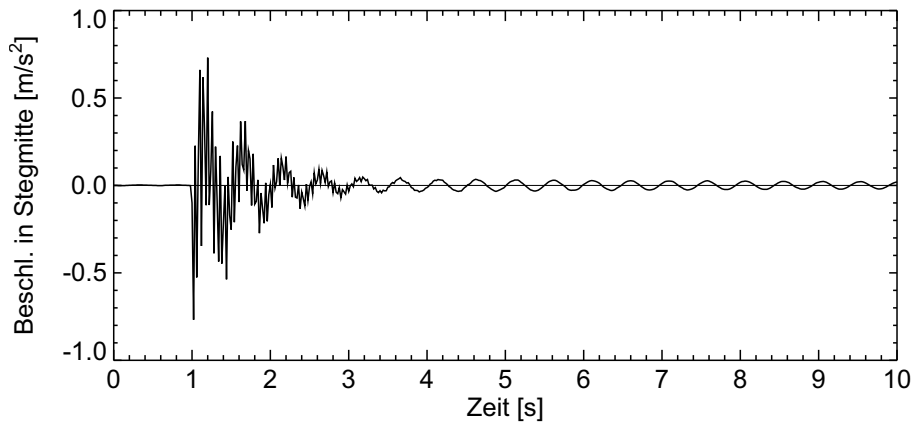


Bild 8.13: Sandsackversuch mit freiem Tilger: Beschleunigung in Stegmitte.

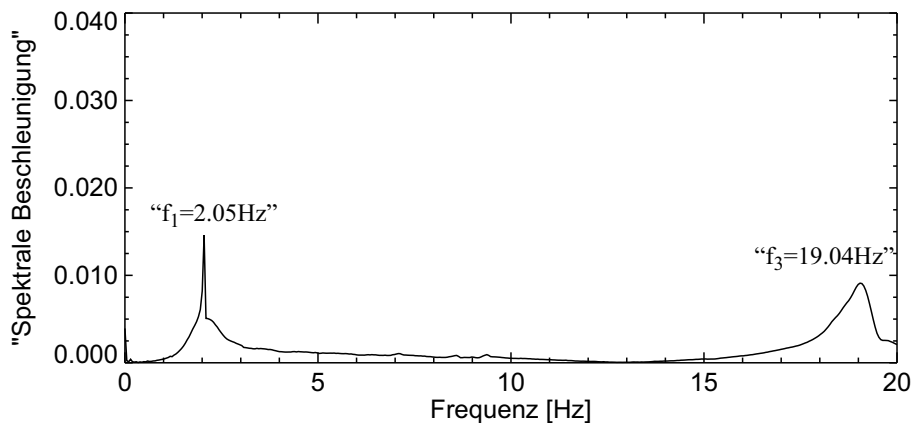


Bild 8.14: Sandsackversuch mit freiem Tilger: Fourier-Spektrum der Beschleunigung in Stegmitte.

### Bemerkungen

- Mit aktivem Tilger werden die "erste" und die "dritte Eigenfrequenz des Stegs" angeregt. Wie erwartet sind diese Frequenzen ein bisschen grösser als die Eigenfrequenzen des Systems (Steg mit blockiertem Tilger), die in Bild 8.6 angegeben sind. Dies, weil die Masse des Tilgers nicht mehr blockiert ist und frei schwingen kann.
- Die Wirkung des Tilgers ist in Bild 8.14 sehr gut zu sehen. Die Höhe der Spitze bei der "ersten Eigenfrequenz" ist wesentlich kleiner als in Bild 8.6. Die Höhe der Spitze bei der "dritten Eigenfrequenz" ist praktisch gleich gross. Die "dritte Eigenschwingung" wird vom Tilger kaum gedämpft.
- Bei den zwei obigen Bemerkungen werden die Eigenfrequenzen in Anführungszeichen erwähnt, weil durch das Lösen des Tilgers Anzahl und Eigenschaften der Eigenschwingungen des Systems sich ändern. Ein direkter Vergleich mit den Eigenschwingungen beim blockierten Tilger ist deshalb nur bedingt möglich.



## 8.6 Gehen 1 Person mit 3 Hz

Eine 65 kg-schwere Person ( $G = 0.64 \text{ kN}$ ) überquert den Steg. Sie geht mit einer Frequenz von etwa 3 Hz, welche deutlich höher als die erste Eigenfrequenz des Stegs ist.

### Bemerkungen

- Die statische Einsenkung des Stegs, wenn die Person in Stegmitte steht, beträgt:

$$d_{\text{st}} = \frac{G}{K_H} = \frac{0.69}{861} = 0.00080 \text{ m} = 0.80 \text{ mm}$$

- Die maximal gemessene Verschiebung in Stegmitte beträgt etwa 2 mm (siehe Bild 8.15), was 2.5 Mal  $d_{\text{st}}$  entspricht. Wie zu erwarten war, bleibt die Auswirkung von dynamischen Effekten eher klein.
- Im Fourier-Spektrum der Beschleunigung in Stegmitte (Bild 8.17) sind vor allem Frequenzen vertreten, die der ersten, zweiten und dritten Harmonischen der Anregung entsprechen. Frequenzen, die Eigenschwingungen des Systems entsprechen sind ebenfalls zu erkennen.

## Versuchsergebnisse

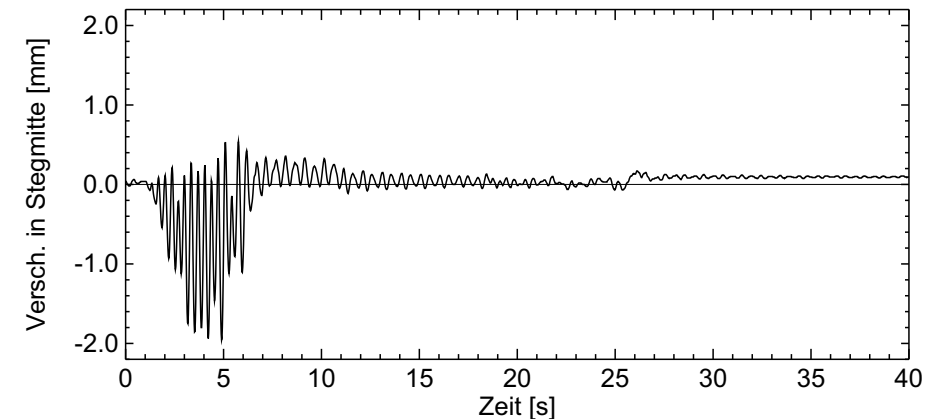


Bild 8.15: Gehen 1 Person mit 3 Hz: Verschiebung in Stegmitte mit blockiertem Tilger.

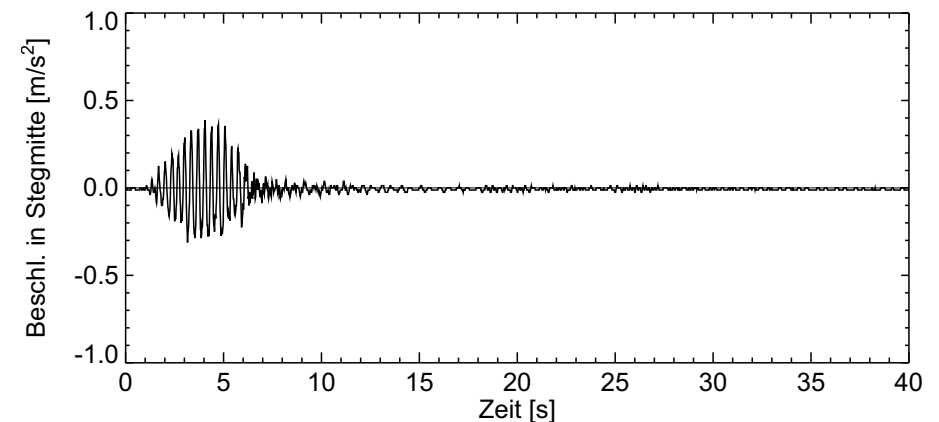


Bild 8.16: Gehen 1 Person mit 3 Hz: Beschleunigung in Stegmitte mit blockiertem Tilger.

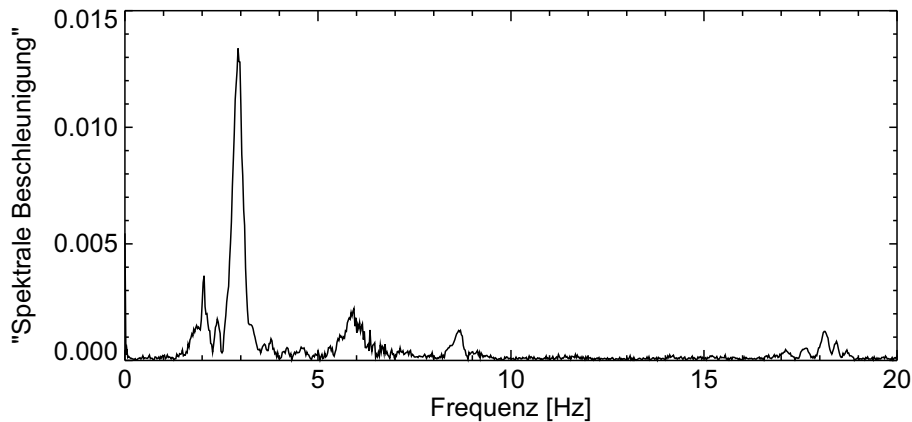


Bild 8.17: Gehen 1 Person mit 3 Hz: Fourier-Spektrum der Beschleunigung in Stegmitte.

## 8.7 Gehen 1 Person mit 2 Hz

Eine 95 kg-schwere Person ( $G = 0.93 \text{ kN}$ ) überquert den Steg. Sie geht mit einer Frequenz von 1.95 Hz, was in etwa der ersten Eigenfrequenz des Stegs entspricht. Die Schrittlänge beträgt 0.70 m.

Gesucht ist die Antwort des Stegs unter dieser Anregung. Ein ähnliches Problem wurde theoretisch im Abschnitt 7.3.3 gelöst.

### 8.7.1 Blockierter Tilger (Gemessen)

Es werden zuerst die maximale Amplituden von Hand berechnet:

$$\text{Statische Verschiebung: } d_{st} = \frac{G}{K_H} = \frac{0.93}{861} = 0.00108 \text{ m} = 1.08 \text{ mm}$$

(Gemessen:  $d_{st} = 1.22 \text{ mm}$ )

$$\text{Geh-Geschwindigkeit: } v = S \cdot f_0 = 0.7 \cdot 1.95 = 1.365 \text{ m/s}$$

$$\text{Überquerungszeit: } \Delta t = L/v = 17.40/1.365 = 12.74 \text{ s}$$

$$\text{Anzahl Zyklen: } N = \Delta t \cdot f_n = 12.74 \cdot 1.95 = 25$$

$$\text{Vergrößerungsfaktor: } \Phi = 22 \quad (\text{Aus Seite 229 mit } \zeta_H = 1.6\%)$$

$$\begin{aligned} \text{Max. Beschleunigung: } a_{max} &= 4\pi^2 \cdot 1.95^2 \cdot 0.00108 \cdot 0.4 \cdot 22 \\ &= 1.43 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

(Gemessen:  $a_{max} = 1.63 \text{ m/s}^2$ )

$$\text{Max. dyn. Verschiebung: } d_{dyn,max} = 1.08 \cdot 0.4 \cdot 22 = 9.50 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Max. Verschiebung: } d_{max} &= 9.50 + 1.08 = 10.58 \text{ mm} \\ &(\text{Gemessen: } d_{max} = 12.04 \text{ mm}) \end{aligned}$$

Versuchsergebnisse

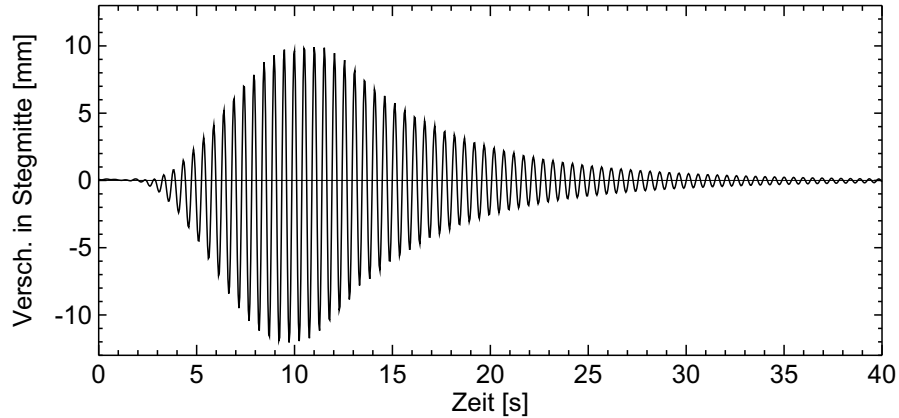


Bild 8.18: Gehen 1 Person mit 2 Hz: Verschiebung in Stegmitte mit blockiertem Tilger.

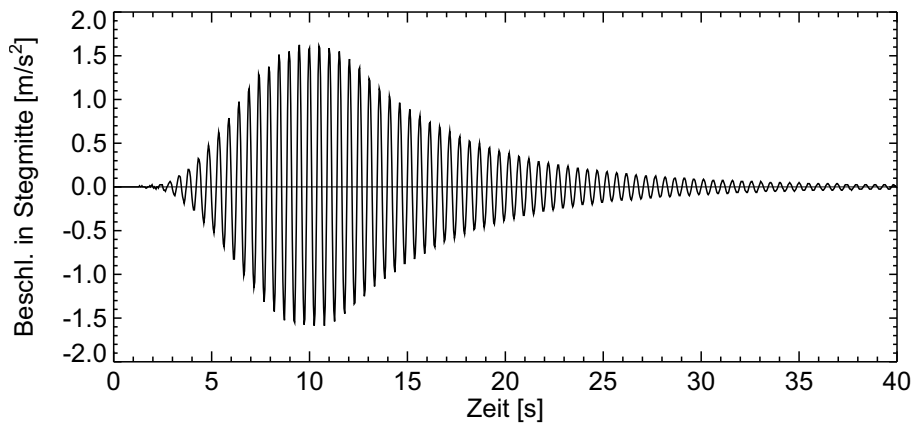


Bild 8.19: Gehen 1 Person mit 2 Hz: Beschleunigung in Stegmitte mit blockiertem Tilger.

8.7.2 Blockierter Tilger (ABAQUS-Simulation)

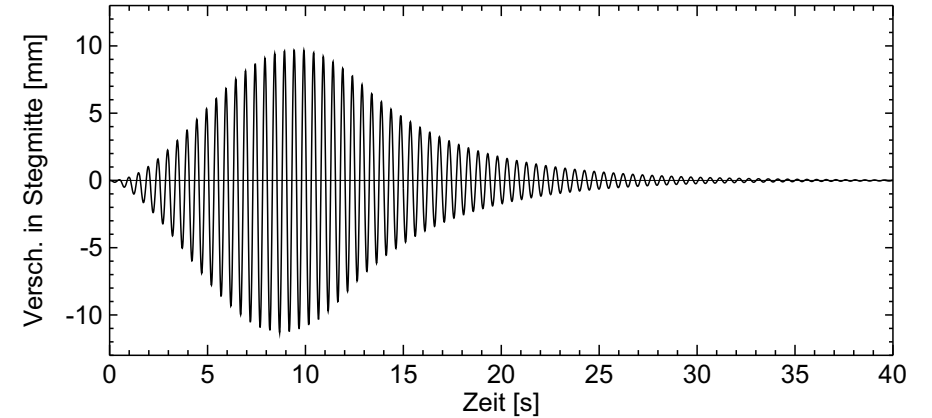


Bild 8.20: Gehen 1 Person mit 2 Hz: Verschiebung in Stegmitte mit blockiertem Tilger (ABAQUS-Simulation).

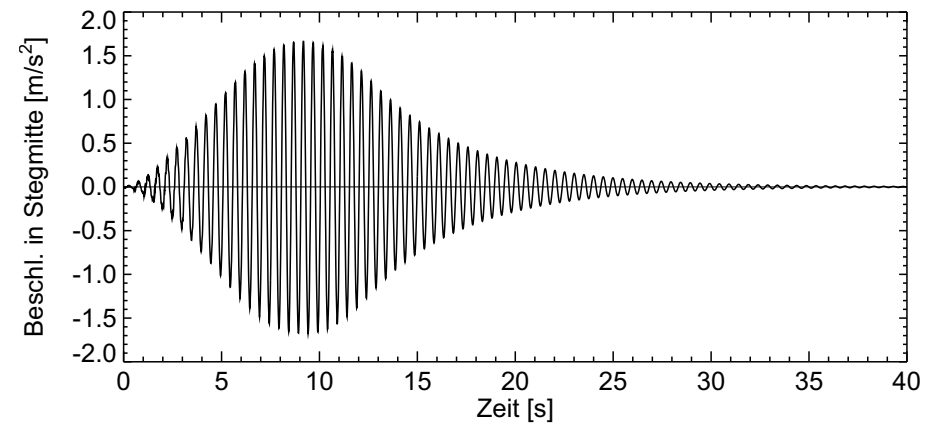


Bild 8.21: Gehen 1 Person mit 2 Hz: Beschleunigung in Trägermitte mit blockiertem Tilger (ABAQUS-Simulation).

Die Kurven in Bilder 8.20 und 8.21 wurden anhand des FE Programms ABAQUS berechnet. Eine ähnliche Berechnung ist in Abschnitt 7.3.3 ausführlich beschrieben. Die dortige Eingabedaten wurden hier nur leicht geändert, um die Eigenschaften des Versuchs besser beschreiben zu können.

### Maximale Schwingungsamplituden

Statische Verschiebung:  $d_{st} = 1.08\text{mm}$   
(Gemessen:  $d_{st} = 1.22\text{mm}$ )

Maximale Verschiebung:  $d_{max} = 11.30\text{mm}$   
(Gemessen:  $d_{max} = 12.04\text{mm}$ )

Vergrößerungsfaktor:  $V = \frac{d_{max}}{d_{st}} = \frac{11.30}{1.08} = 10.5$

Maximale Beschleunigung:  $a_{max} = 1.68\text{m/s}^2$   
(Gemessen:  $a_{max} = 1.63\text{m/s}^2$ )

Die maximalen Schwingungsamplituden der numerischen Simulation und des Versuchs stimmen recht gut überein und auch die Zeitverläufe von Bilder 8.18 und 8.21 sehen recht ähnlich aus.

Bei den ersten 2 Sekunden des Versuchs sind Verschiebung und Beschleunigung Null, weil die Person mit einer kleinen Verzögerung zu gehen anfing.

### 8.7.3 Freier Tilger

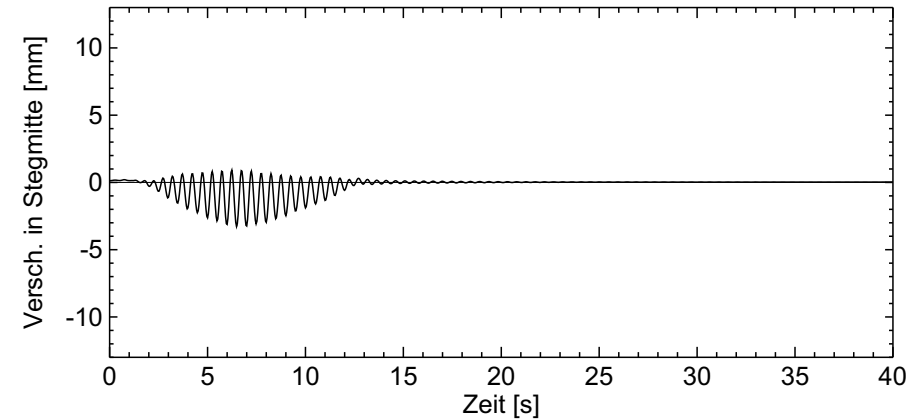


Bild 8.22: Gehen 1 Person mit 2 Hz: Verschiebung in Stegmitte mit freiem Tilger.

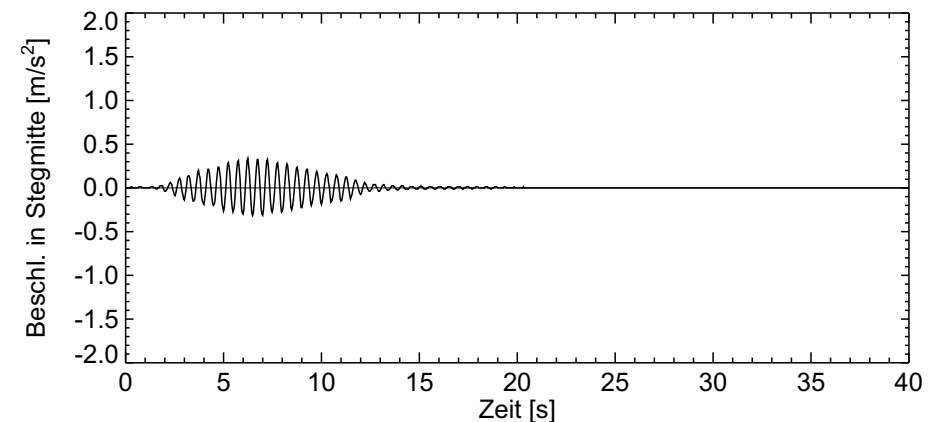


Bild 8.23: Gehen 1 Person mit 2 Hz: Beschleunigung in Stegmitte mit freiem Tilger.

### Schätzung der maximalen Schwingungsamplituden

Vergrößerungsfaktor: zirka 5.5 (Aus Seite 250)

Maximale dyn. Versch.:  $d_{\text{dyn,max}} = 1.08 \cdot 0.4 \cdot 5.5 = 2.38 \text{ mm}$

Maximale Verschiebung:  $d_{\text{max}} = 2.38 + 1.08 = 3.46 \text{ mm}$   
(Gemessen:  $d_{\text{max}} = 3.27 \text{ mm}$ )

Maximale Beschl.:  $a_{\text{max}} = 4\pi^2 \cdot 1.95^2 \cdot 0.00108 \cdot 0.4 \cdot 5.5$   
 $= 0.36 \text{ m/s}^2$   
(Gemessen:  $a_{\text{max}} = 0.34 \text{ m/s}^2$ )

#### 8.7.4 Bemerkungen zu "Gehen 1 Person mit 2 Hz"

- Die Wirkung des Tilgers ist in den Bildern 8.22 und 8.23 leicht zu erkennen. Die maximale Beschleunigung in Stegmitte sinkt von  $1.63 \text{ m/s}^2$  auf  $0.34 \text{ m/s}^2$ , was einem zulässigen Wert entspricht.

### 8.8 Gehen Gruppe mit 2 Hz

Alle Studierenden (24 Personen) überqueren den Steg in einem kontinuierlichen Fluss. Es wird ein Metronom eingeschaltet um sicherzustellen, dass alle im gleichen Schritt und mit einer Frequenz von etwa 2 Hz gehen.

Der Versuch wird sowohl mit blockiertem (Abschnitt 8.8.1) als auch mit freiem (Abschnitt 8.8.2) Tilger durchgeführt.

In den Bildern 8.24 bis 8.27 werden die ersten 40 Sekunden der Antwort des Stegs dargestellt.

#### Bemerkungen

Die Resultate der Versuche mit mehreren Personen, die auf dem Steg gehen, werden kommentiert, indem sie mit den Resultaten der Versuche mit der Einzelperson (siehe Abschnitt 8.7) verglichen werden. Aus diesem Grund werden die Maximalwerte der Schwingungsamplituden aus den Bildern 8.18, 8.19, 8.22, 8.23 und 8.24 bis 8.27 in den Tabellen 8.1 und 8.2 zusammengefasst.

Fall	Gruppe	1 Person	Verhältnis
Maximale Beschleunigung in Stegmitte. Tilger blockiert.	2.05 m/s <sup>2</sup>	1.63 m/s <sup>2</sup>	1.26
Maximale Beschleunigung in Stegmitte. Tilger frei.	0.96 m/s <sup>2</sup>	0.34 m/s <sup>2</sup>	2.82
Verhältnis	2.14	4.79	

Tabelle 8.1: Vergleich der maximalen Beschleunigungen in Stegmitte.

Fall	Gruppe	1 Person	Verhältnis
Maximale Verschiebung in Stegmitte. Tilger blockiert.	20.52 mm	12.04 mm	1.70
Maximale Verschiebung in Stegmitte. Tilger frei.	12.28 mm	3.27 mm	3.76
Verhältnis	1.67	3.68	

Tabelle 8.2: Vergleich der maximalen Verschiebungen in Stegmitte.

Es wird weiterhin angenommen, dass sich auf dem Steg maximal nur etwa 16 der 24 Personen gleichzeitig befinden.

Es können dabei folgende Bemerkungen gemacht werden:

- Die maximal gemessene Beschleunigung in Stegmitte mit blockiertem Tilger ist lediglich 1.26-mal grösser als die Beschleunigung die durch die Person allein erzeugt wurde. Gemäss Abschnitt 7.3.3 hätte man bei der Gruppe eine grössere Beschleunigung erwarten können ( $\sqrt{16} = 4$ ). Ein Grund, warum die maximale Beschleunigung relativ klein geblieben ist, ist die Schwierigkeit im Schritt zu gehen, wenn der "Boden unruhig ist". Mit ein bisschen Übung könnte die Gruppe deutlich grössere Beschleunigungen erreichen. Es ist weiterhin zu merken, dass die Einzelperson von Abschnitt 8.7 mit ihrem 95 kg vermutlich deutlich schwerer als den Mittelwert der Gruppe ist.
- Die maximal gemessene Verschiebung in Stegmitte mit blockiertem Tilger ist 1.70-mal grösser als die Verschiebung die durch die Person allein erzeugt wurde. Bei der Verschiebung

ist die Erhöhung im Vergleich zur Einzelperson grösser als bei der Beschleunigung, weil bei der Gruppe die statische Einsenkung wesentlich grösser ist.

- Die Aktivierung des Tilgers bewirkt bei der Einzelperson eine Reduktion der maximalen Beschleunigung in Stegmitte um einen Faktor 4.79. Bei der Gruppe ist dieser Faktor lediglich 2.14. Es ist dabei zu bemerken, dass beim aktiven Tilger die Schwingungen des Stegs wesentlich kleiner sind und deshalb für die Gruppe wesentlich einfacher ist im Schritt zu gehen. Es ist somit anzunehmen, dass beim aktiven Tilger die Einwirkung ungünstiger als beim blockierten Tilger ausgefallen ist. Dies erklärt die scheinbar kleinere Wirksamkeit des Tilgers bei der Gruppe.

## 8.8.1 Blockierter Tilger

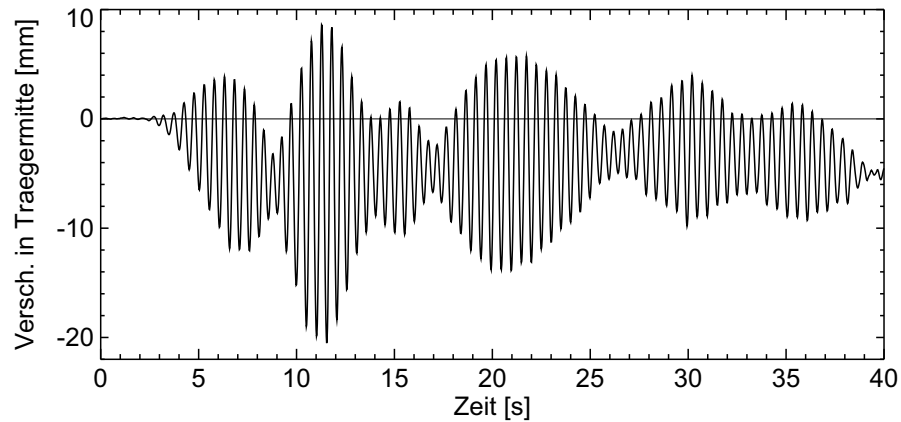


Bild 8.24: Gehen Gruppe mit 2 Hz: Verschiebung in Trägermitte mit blockiertem Tilger.

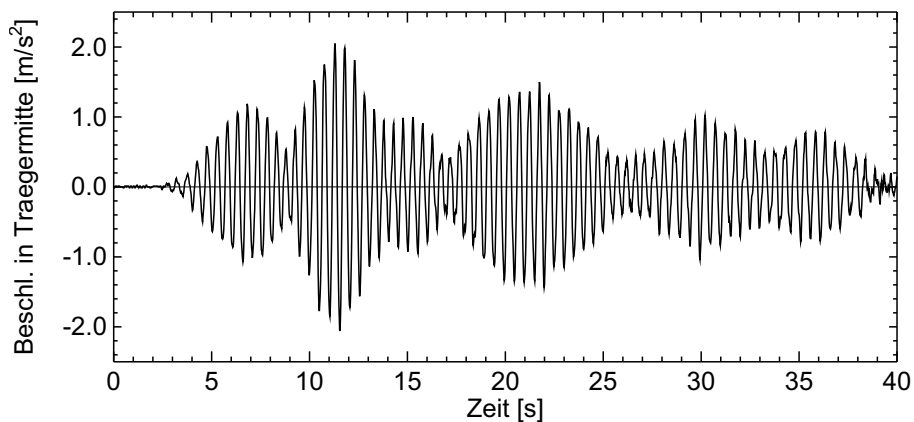


Bild 8.25: Gehen Gruppe mit 2 Hz: Beschleunigung in Trägermitte mit blockiertem Tilger.

## 8.8.2 Freier Tilger

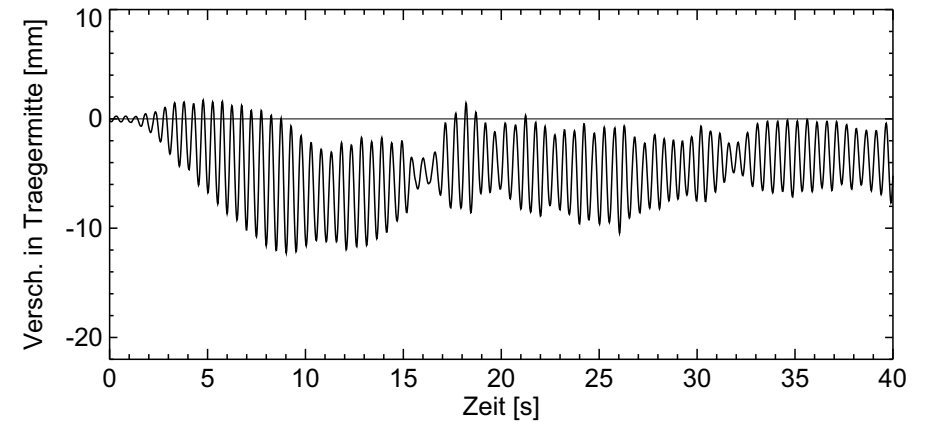


Bild 8.26: Gehen Gruppe mit 2 Hz: Verschiebung in Trägermitte mit freiem Tilger.

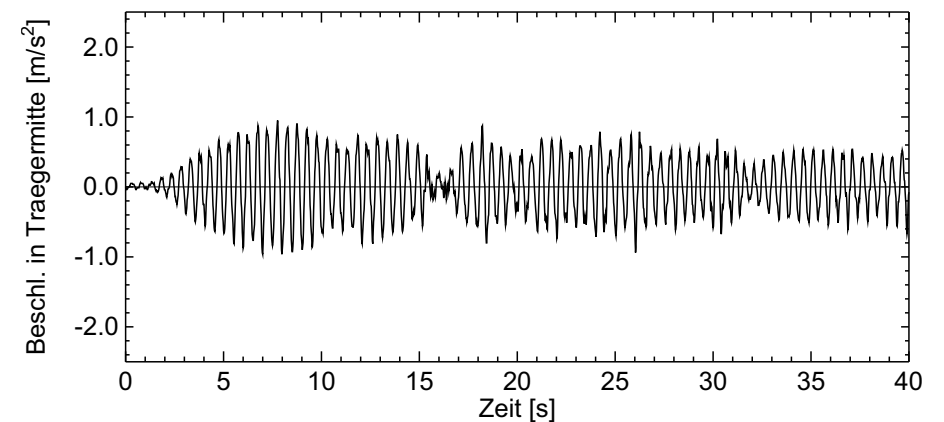


Bild 8.27: Gehen Gruppe mit 2 Hz: Beschleunigung in Trägermitte mit freiem Tilger.

## 8.9 Hüpfen 1 Person mit 2 Hz

Eine 72 kg-schwere Person ( $G = 0.71 \text{ kN}$ ) hüpft in Stegmitte mit einer Frequenz von 1.95 Hz, was in etwa der ersten Eigenfrequenz des Stegs entspricht.

Gesucht ist die Antwort des Stegs unter dieser Anregung. Ein ähnliches Problem wurde theoretisch in Abschnitt 5.1.3 gelöst.

### 8.9.1 Blockierter Tilger

Es werden zuerst die maximalen Amplituden von Hand berechnet:

$$\text{Statische Verschiebung: } d_{\text{st}} = \frac{G}{K_{\text{H}}} = \frac{0.71}{861} = 0.0008 \text{ m} = 0.82 \text{ mm}$$

$$(\text{Gemessen: } d_{\text{st}} = 0.93 \text{ mm})$$

$$\text{Vergrößerungsfaktor: } V = \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{(2 \cdot 0.016)} = 31.25$$

$$\begin{aligned} \text{Max. Beschleunigung: } a_{\text{max}} &= 4\pi^2 \cdot 1.95^2 \cdot 0.0008 \cdot 1.8 \cdot 31.25 \\ &= 6.92 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

$$(\text{Gemessen: } a_{\text{max}} = 7.18 \text{ m/s}^2)$$

$$\text{Max. dyn. Verschiebung: } d_{\text{dyn,max}} = 0.82 \cdot 1.8 \cdot 31.25 = 46.13 \text{ mm}$$

$$\text{Max. Verschiebung: } d_{\text{max}} = 46.13 + 0.82 = 46.95 \text{ mm}$$

$$(\text{Gemessen: } d_{\text{max}} = 51.08 \text{ mm})$$

## Versuchsergebnisse

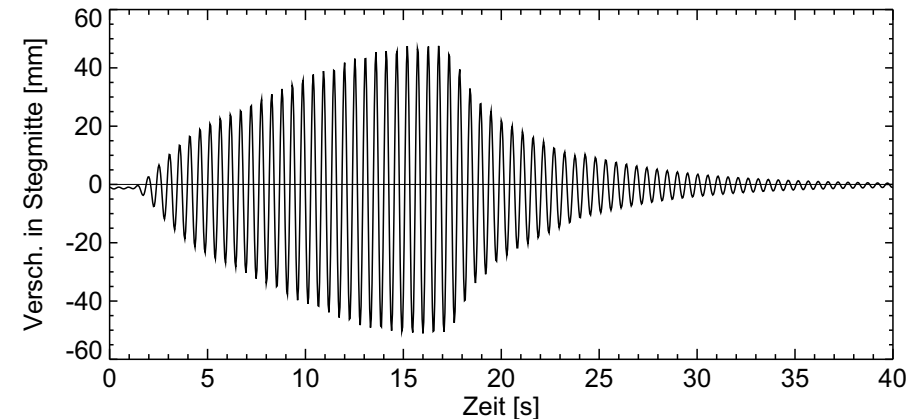


Bild 8.28: Hüpfen 1 Person mit 2 Hz: Verschiebung in Stegmitte mit blockiertem Tilger.

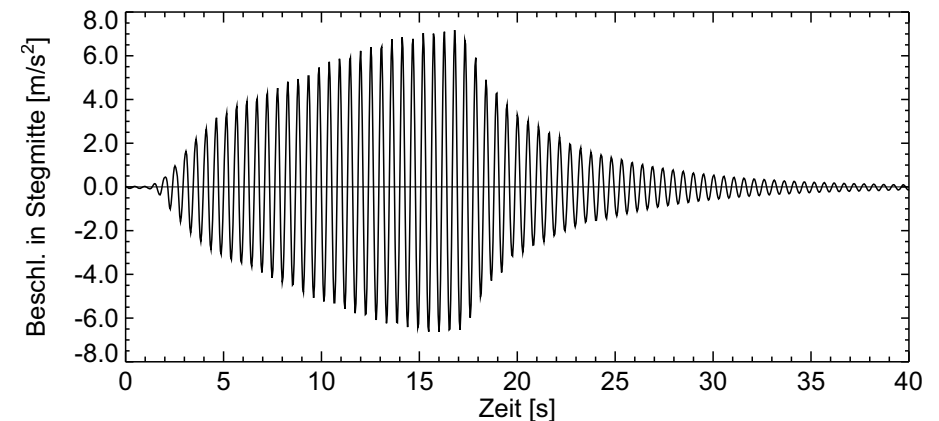


Bild 8.29: Hüpfen 1 Person mit 2 Hz: Beschleunigung in Stegmitte mit blockiertem Tilger.



## 8.9.2 Freier Tilger

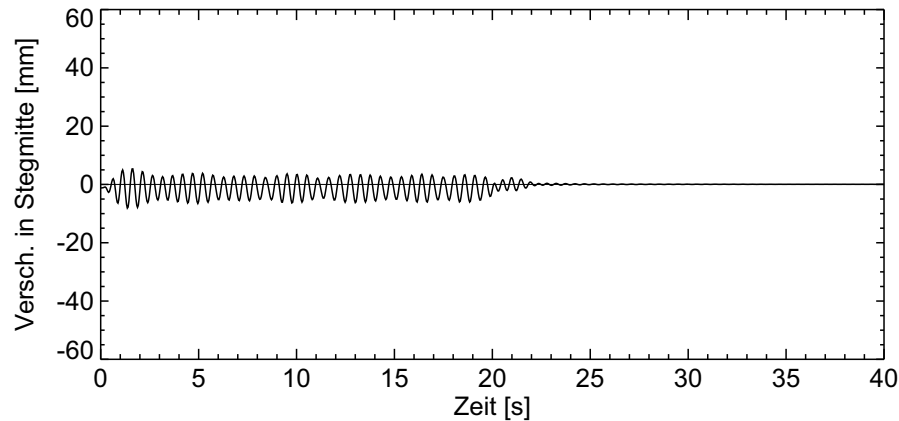


Bild 8.30: Hüpfen 1 Person mit 2 Hz: Verschiebung in Stegmitte mit freiem Tilger.

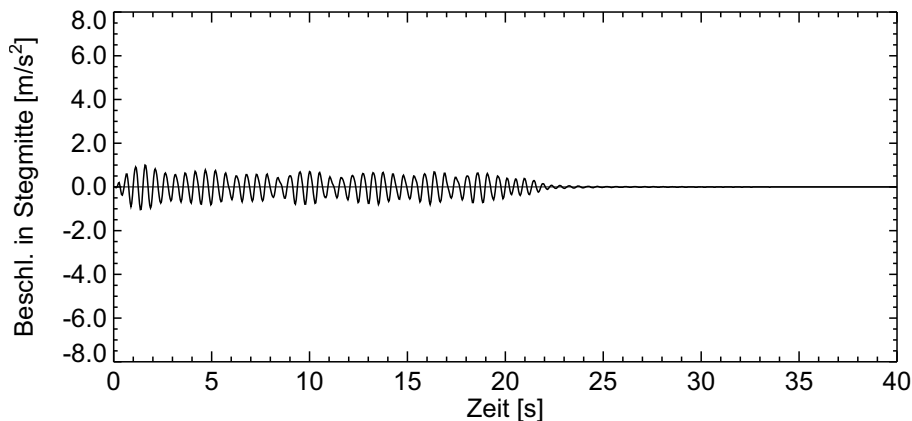


Bild 8.31: Hüpfen 1 Person mit 2 Hz: Beschleunigung in Stegmitte mit freiem Tilger.

## Schätzung der maximalen Schwingungsamplituden

Vergößerungsfaktor: zirka 5.5 (Aus Seite 250)

Maximale dyn. Versch.:  $d_{\text{dyn,max}} = 0.82 \cdot 1.8 \cdot 5.5 = 8.12 \text{ mm}$

Maximale Verschiebung:  $d_{\text{max}} = 8.12 + 0.82 = 8.94 \text{ mm}$   
(Gemessen:  $d_{\text{max}} = 8.12 \text{ mm}$ )

Maximale Beschl.:  $a_{\text{max}} = 4\pi^2 \cdot 1.95^2 \cdot 0.0008 \cdot 1.8 \cdot 5.5$   
 $= 1.22 \text{ m/s}^2$   
(Gemessen:  $a_{\text{max}} = 1.04 \text{ m/s}^2$ )

## 8.9.3 Bemerkungen zu “Hüpfen 1 Person mit 2 Hz”

- Beim Hüpfen kann der Steg wesentlich höher angeregt werden als beim Gehen.
- Die erreichte Beschleunigung  $a_{\text{max}} = 7.18 \text{ m/s}^2 = 73\% g$  ist sehr gross und zwei hüpfende Personen könnten das Abheben des Trägers leicht erzeugen.
- Die Wirkung des Tilgers ist in den Bildern 8.30 und 8.31 deutlich zu erkennen. Die maximale Beschleunigung in Stegmitte sinkt von  $7.18 \text{ m/s}^2$  auf  $1.04 \text{ m/s}^2$ , was aber immer noch als unangenehm empfunden wird.