

# Dynamische Berechnung einer begehbaren Doppelhelix mit Schwingungstilgern

Dr. Bernhard Schäpertöns<sup>1</sup>, Daniel Schäfer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CBP Cronauer Beratung Planung, Beratende Ingenieure GmbH, München

## ZUSAMMENFASSUNG

Für die begehbare Doppelhelix des Künstlers Olafur Eliasson wurde die Schwingungsanfälligkeit untersucht. Zur Reduktion der erheblichen Schwingungen sind Schwingungstilger vorgesehen, die im Tragrohr des Bauwerks untergebracht sind, und so die Gestalt des Kunstwerks nicht verändern. Mit dieser Maßnahme werden die zu erwartenden Schwingungen auf ein befriedigendes Maß bei planmäßiger Benutzung und auf ein erträgliches Maß bei unplanmäßiger Nutzung reduziert. Erst mit diesen Maßnahmen kann die Idee des Künstlers in die Realität umgesetzt werden.

## 1 BAUWERKSBESCHREIBUNG

Die begehbare Doppelhelix des Künstlers Olafur Eliasson wird im Hof eines Bürogebäudes an der Theresienhöhe im Münchner Westen aufgestellt. Die Form des Bauwerks ist die Projektion einer Doppelhelix, auf die Oberfläche einer Kugel mit etwa 8 m Durchmesser. An einem Stahltragrohr werden Holzstufen und Edelstahlgeländer angebracht, so dass das Kunstwerk als Endlos-Treppe begangen werden kann.

Das Helix-Tragrohr wird am Tiefpunkt mit einem größeren Rohrstück eingefasst und an ein Stahl-Fußkreuz angeschlossen. Die Endpunkte des Fußkreuzes lagern auf der Decke bzw. den Stahlbetonstützen der Tiefgarage. Das Fußkreuz wird von dem Bodenbelag des Innenhofs überdeckt. So entsteht der Eindruck das Kunstwerk schwebt über dem Boden. Abb. 1.

Der Außendurchmesser des Tragrohrquerschnitts beträgt konstant 323,9 mm. Die Wandstärke ist entsprechend der Belastung über die Bauwerkshöhe zwischen 16 mm und 60 mm

abgestuft. Das Fußkreuz besteht aus Walzprofil-

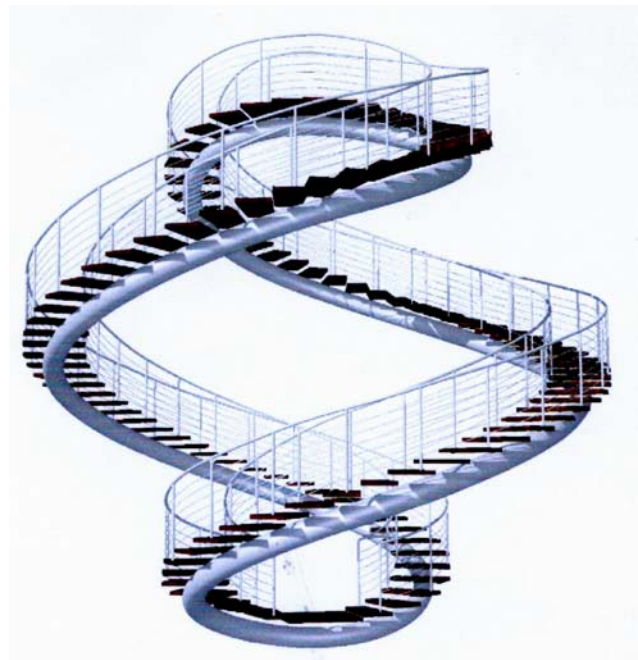


Abb. 1: 3D-Ansicht des Kunstwerks

len HEM-400.

## 2 DYNAMISCHE UNTERSUCHUNG

Ohne weitere Maßnahmen lassen die Form und die leichte Tragkonstruktion sowie das geringe Dämpfungsmaß der geschweißten Stahlkonstruktion eine hohe Schwingungsanfälligkeit erwarten.

Für die dynamische Untersuchung wird das Tragwerk mit FE-Stabelementen abgebildet. Die Knotenpunkte der Stäbe folgen der Raumkurve des gewundenen Tragrohrs. Die Stablänge beträgt ca. 0,5 m.

Als Eigendämpfung des Systems wird ein Lehrsches Dämpfungsmaß von  $\eta = 0,4\%$  angenommen. Für die numerischen Berechnungen werden daraus die massen- und steifigkeitsproportionalen Rayleigh-Dämpfungsparameter ermittelt.

## 2.1 Eigenformen

Für die Bewertung des Schwingungsverhaltens des Kunstwerks wurden die ersten 12 Eigenformen bestimmt. Dabei werden neben der Bauwerksmasse keine zusätzlichen Masse berücksichtigt. Der Aufenthalt einer größeren Anzahl von Personen wird hier also nicht unterstellt. Die Berücksichtigung des Eigengewichts von 1-2 Personen bewirkt lediglich vernachlässigbar kleine Änderungen der Eigenfrequenzen.

Vergleichsrechnungen mit der geometrisch nichtlinearen Steifigkeit aus dem Lastfall Eigengewicht zeigen, dass Effekte aus Theorie II. Ordnung vernachlässigbar sind. Die Konstruktion trägt die Lasten im wesentlichen über Biegung und Torsion ab.

In Abb. 2 sind die ersten vier Eigenformen dargestellt. Die ersten beiden Eigenformen sind horizontale Kippbewegungen um den Fusspunkt, die dritte eine symmetrische Drehbewegung um die Mittelachse und die vierte eine vertikale Einfederung. Die weiteren Eigenformen stellen im wesentlichen teilweise gekoppelte Oberschwingungen der ersten vier Grundschwingungsformen dar.

## 2.2 Erregerlasten

Die typischen Schrittfolgen liegen beim Gehen zwischen 1,6 und 2,2 Hz. Darüber beginnt der Bereich des Laufens bzw. Rennens mit maximal 3,5 Hz. Schrittfolgen unter 1,6 Hz sind bei gemächlichem Schlendern denkbar. Bachmann (1988, 1997), Petersen (2000, 2001). Menschen verursachen beim Gehen Lasten in alle räumliche Richtungen: Vertikal, horizontal-längs (longitudinal) und horizontal-quer (lateral).

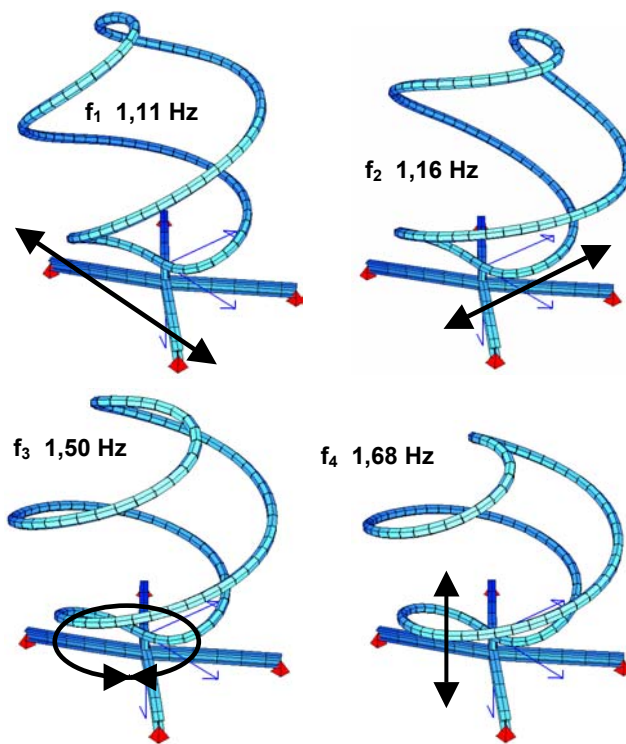


Abb. 2: Die ersten vier Eigenformen

Tabelle 1 zeigt in der linken Spalte die ersten 12 Eigenfrequenzen des Tragwerks. Daneben sind die Belastungen durch Fußgänger in den drei Raumrichtungen mit ihren harmonischen Anteilen aufgelistet. Zu jedem harmonischen Anteil ist diejenige Schrittfolgen  $f_s$  aufgeführt, welche die entsprechende Eigenform anregt. Man erkennt an den markierten Tabellenwerten (gewählte Schrittfolgen 0,8 – 2,2 Hz), dass alle Lastrichtungen mit nahezu allen harmonischen Anteilen die ersten elf Bauwerkseigenformen anregen können.

Zum Beispiel kann der 2. harmonische Anteil der Vertikallasten (vertikal, #2) bei einer Schrittfolgen von  $f_s = 0,841$  Hz Eigenform

Eigenform		vertikal			longitudinal			lateral	
		# 1	# 2	# 3	# 1/2	# 1	# 2	# 1/2	# 3/2
Nr.	f [Hz]	$f_s$ [Hz]	$f_s$ [Hz]	$f_s$ [Hz]	$f_s$ [Hz]	$f_s$ [Hz]	$f_s$ [Hz]	$f_s$ [Hz]	$f_s$ [Hz]
1	1,108	1,108	0,554	0,369	2,216	1,108	0,554	2,216	0,739
2	1,159	1,159	0,580	0,386	2,318	1,159	0,580	2,318	0,773
3	1,495	1,495	0,748	0,498	2,990	1,495	0,748	2,990	0,997
4	1,681	1,681	0,841	0,560	3,362	1,681	0,841	3,362	1,121
5	2,492	2,492	1,246	0,831	4,984	2,492	1,246	4,984	1,661
6	2,843	2,843	1,422	0,948	5,686	2,843	1,422	5,686	1,895
7	3,221	3,221	1,611	1,074	6,442	3,221	1,611	6,442	2,147
8	4,235	4,235	2,118	1,412	8,470	4,235	2,118	8,470	2,823
9	4,894	4,894	2,447	1,631	9,788	4,894	2,447	9,788	3,263
10	5,373	5,373	2,687	1,791	10,746	5,373	2,687	10,746	3,582
11	5,949	5,949	2,975	1,983	11,898	5,949	2,975	11,898	3,966
12	8,123	8,123	4,062	2,708	16,246	8,123	4,062	16,246	5,415

Tabelle 1: Bauwerkseigenfrequenzen, Schrittfolgen  $f_s$  zur Anregung der Eigenformen

Nr. 4 anregen.

### 3 SCHWINGUNGSREDUZIERENDE MASSNAHMEN

Vergleicht man die Bauwerkseigenfrequenzen mit den möglichen Erregerfrequenzen der einwirkenden Lasten, so sind aufgrund der relativ geringen Bauwerksmasse und der sehr geringen Dämpfung starke Anregungseffekte zu erwarten.

Deswegen sind unbedingt Maßnahmen zur Reduktion der Schwingungsanfälligkeit zu ergreifen.

#### 3.1 Verschiebung der Eigenfrequenzen

Ist ein Tragwerk mit Fußgängerlasten so ausgelegt, dass zum Beispiel die erste vertikale Eigenfrequenz größer als etwa 5 Hz ist, sind i.d.R. keine nennenswerten vertikalen Schwingungen zu erwarten.

Eine sichere Maßnahme gegen die Schwingungsanfälligkeit wäre demnach, die Steifigkeit der Konstruktion zu erhöhen. Dies würde für das Tragrohr jedoch mindestens eine Verdreifachung des Durchmessers bedeuten, was wiederum das Erscheinungsbild des Kunstwerks zu stark verändert.

Um die Konstruktion auszusteifen, wären ferner Seilabspannungen denkbar, die aber ebenfalls zu stark in die Gestaltung des Bauwerks eingreifen.

#### 3.2 Erhöhung der Strukturmasse/-dämpfung

Durch Einsatz einer Füllung mit Beton können

oft ausreichend hohe Bauwerksmassen und Dämpfungswerte erreicht werden, um störende Schwingungen zu verhindern. Dies führt hier aber nicht zu einer wesentlichen Verbesserung des Schwingungsverhaltens.

#### 3.3 Einsatz von Schwingungstilgern

Als geeignete Maßnahme gegen die Schwingungsanfälligkeit erweist sich hier der Einsatz von Schwingungstilgern, englisch Tuned Mass Dampers (TMD).

##### 3.3.1 Entwurf der TMD

Um das Erscheinungsbild des Kunstwerks nicht zu beeinträchtigen, wurden TMD zur Unterbringung im Rohrquerschnitt entworfen. Dabei werden Massen, Stahl-Druckfedern und viskose Dämpfer verwendet. Es sind TMD für die erste und zweite Eigenform (horizontale Kipp-schwingungen) sowie für die vierte Eigenform (vertikales Einfedern) vorgesehen. Diese wiederum müssen in mehrere einzelne TMD aufgeteilt werden.

Insgesamt werden vier TMD für die vertikale Richtung (V1, V2) und insgesamt vier Stück für die horizontalen Eigenformen (H1, H2) eingebaut.

Die Einbauorte befinden sich im oberen Teil der Spirale, wo die Wandstärke des Rohrs nicht mehr als 25 mm beträgt und die Wirksamkeit der TMD am besten ist. Auf die Anordnung weiterer TMD im unteren Bereich der Spirale muss wegen der extrem beengten Platzverhältnisse im Tragrohr mit Wandstärken von 50 oder 60 mm verzichtet werden. Die TMD Massen incl. Führungskonstruktion müssen vor der

#### Längsschnitt Rohr $\varnothing$ 323,9 mm

M = 1 : 5

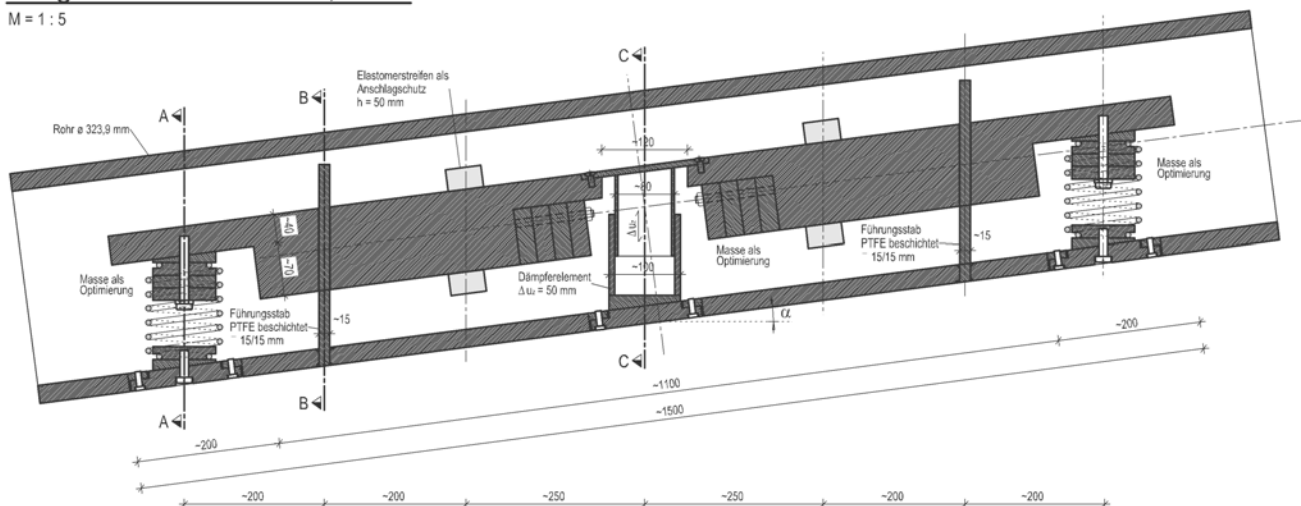


Abb. 3: Skizze Vertikal-TMD

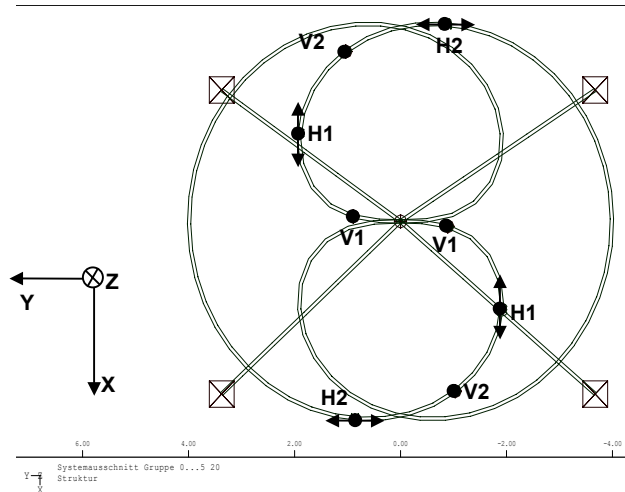


Abb. 4: Systemlinie, Einbauorte der gewählten TMD

Endmontage der Tragrohre eingebaut werden. Durch kleine Montageöffnungen können danach die Federn, Dämpfer eingebaut und die Masse zur Anpassung des TMD an die gemessenen Bauwerksfrequenzen verändert werden.

Die TMD-Kenngrößen Masse, Frequenz, Federsteifigkeit, Dämpferkonstante wurden nach dem Optimierungskriterium von Den Hartog (1984) festgelegt.

Die kinetisch äquivalenten Massen  $m$  des Bauwerks werden für die zu bedämpfenden Eigenformen und die TMD-Einbauorte nach Gleichung (1) bestimmt. Petersen (2001).

$$m = \int_0^l \mu(s) \cdot \eta^2(s) ds \approx \sum_{i=1}^n m_i \cdot \left( \frac{|\vec{u}_i|}{|\vec{u}_{TMD}|} \right)^2 \quad (1)$$

mit:

- $\mu(s)$  : Massenverteilung
- $\vec{u}_i$  : Verschiebung Eigenform am Knoten  $i$
- $\vec{u}_{TMD}$  : Verschiebung Eigenform in Wirkungsrichtung des TMD

Grundriß Rohr  $\varnothing$  323,9 mm

M = 1 : 5

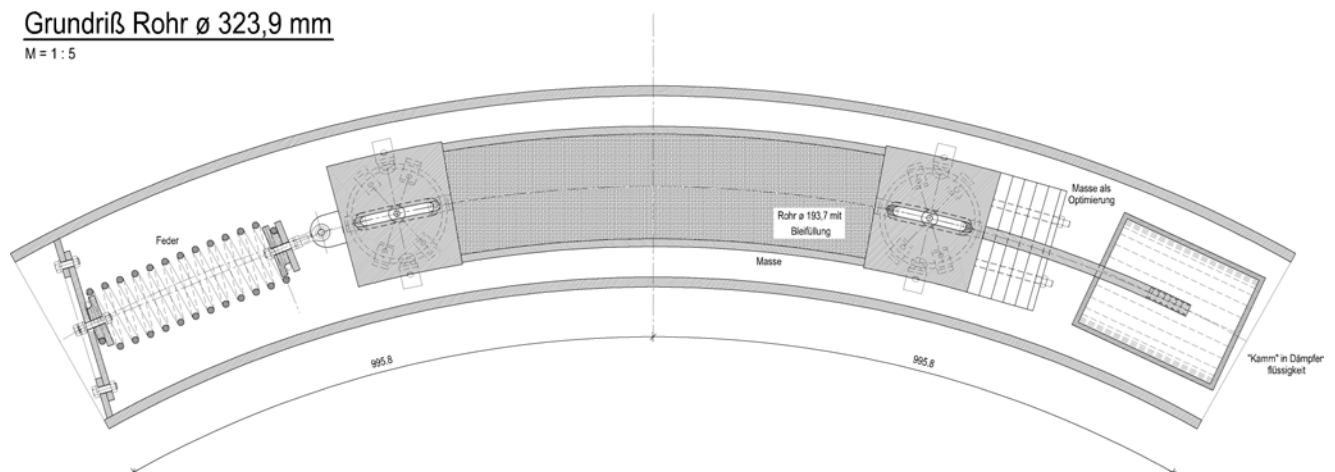


Abb. 5: Skizze Horizontal-TMD

Tilgerbezeichnung	Wirkungsrichtung	Anzahl	Anordnung mittig in Rohrschuss	Frequenz Bauwerk	Frequenz Tilger	Kinetisch äquivalente Masse	Masse je Einzel-Tilger	Massenausgleich	$\Sigma$ Federkonstanten je Einzel-Tilger	$C_D$ je Einzel-Tilger
		1)	f <sup>5)</sup>	f	m	m <sup>2)</sup>	$\Delta m$ <sup>3)</sup>	$C_F$ <sup>2)</sup>	$C_D$ <sup>4)</sup>	
		[-]	[-]	[Hz]	[Hz]	[t]	[kg]	[%]	[kN/m]	[kNs/m]
V1	Z (vertikal)	2	1 oben	1,60	1,47	6,67	150	$\pm 10$	12,8	0,45
V2	Z (vertikal)	2	3 oben	1,60	1,47	6,63	150	$\pm 10$	12,8	0,45
H1	X (horizontal)	2	2 oben	1,10	1,08	6,07	140	$\pm 10$	6,39	0,17
H2	Y (horizontal)	2	4 oben	1,06	1,04	8,79	200	$\pm 10$	8,47	0,23

Tabelle 2: TMD-Kenngrößen

kungs richtung des TMD  
 $m_i$  : idealisierte Punktmasse am Knoten  $i$

Die vertikalen TMD bestehen aus einer im Querschnitt in etwa elliptisch geformten Masse, zwei Druckfedern und einem Dämpfertopf. Die vertikale Führung wird durch reibungsarm gelagerte Stangen erreicht. Abb. 3.

Die horizontalen TMD erhalten gebogene, zylindrische Massen, die auf Rollen geführt werden. Gegenüber der Druckfeder wird ein wannenförmiges Dämpferelement angeordnet. Das mit der Masse verbundene Schwert durchstreift bei Bewegungen die Dämpferflüssigkeit und überträgt so genau definierte, geschwindigkeitsabhängige Dämpferkräfte. Abb. 5.

### 3.3.2 Abschätzung der Wirksamkeit der Maßnahme

Zur Überprüfung der vertikalen TMD wird am FE-Modell auf der Spitze der Doppelhelix eine sinusförmige periodische Last von 1,0 kN

angesetzt. Die Erregerfrequenz wird im Bereich von 1,5 bis 2,0 Hz variiert. Die Last entspricht in etwa der vertikalen Anregung von drei Personen. Die dabei auftretenden vertikalen Beschleunigungen  $a_z$  bleiben kleiner als  $0,85 \text{ m/s}^2$ . Analytische Vergleichsrechnungen bestätigen die Ergebnisse.

Für den Test der horizontalen TMD wird am äußeren Umfang der Spirale eine Vertikallast von 1,0 kN mit einer Erregerfrequenz im Bereich von 0,8 bis 1,2 Hz angesetzt. Hier bleiben die Vertikalbeschleunigungen  $a_z$  kleiner  $0,4 \text{ m/s}^2$  und die Horizontalbeschleunigungen  $a_x, a_y$  kleiner  $0,3 \text{ m/s}^2$ .

#### 4 NUMERISCHE SIMULATION FUSSGÄNGER

Die ermittelten Beschleunigungen in Kapitel 3.3.2 stellen eine Abschätzung der möglichen Schwingungen dar und berücksichtigen nicht alle harmonischen Anteile der Fußgängerlasten.

Um eine realistische Vorhersage der auftretenden Schwingungen zu erhalten, werden numerische Simulationen eines Fußgängers, der die Doppelhelix einmal überschreitet, im Zeitbereich durchgeführt. Dabei wird eine konstante Schrittfrequenz während der gesamten Begehung angenommen.

Die Bewegungsgleichung des Tragwerks wird mit dem Zeitschrittverfahren nach Newmark-Wilson mit konstanter Beschleunigung im Zeitschritt numerisch integriert. Die Zeitschrittweite wurde zu 10 ms gewählt.

##### 4.1 Lastbilder Gehen

Die einwirkenden Kräfte für die Lastcharakteristik Gehen werden nach den Angaben von Bachmann (1997) bestimmt.

Für die Lastfunktion (2) werden geeignete

$$F_p = \alpha_0 \cdot G + \sum_{i=1}^n G \cdot \alpha_i \cdot \sin(2\pi \cdot i \cdot f_p - \phi_i)$$

(2)

vertikal			longitudinal			lateral		
i	$\alpha_i$	$\phi_i$	I	$\alpha_i$	$\phi_i$	i	$\alpha_i$	$\phi_i$
1	0,4	0	1/2	-0,1	$4\alpha_i$	1/2	0,1	$\alpha_i/5$
2	0,1	$\alpha_i/2$	1	-0,2	$2\alpha_i$	3/2	0,1	$3\alpha_i/5$
3	0,1	$\alpha_i/2$	2	0,1	$\alpha_i/5$			
$\alpha_0 = 1,0$			$\alpha_0 = 0$			$\alpha_0 = 0$		

Abb. 6: Annahmen für die Lastgenerierung, Lastbilder Gehen

Phasenwinkel und Vorzeichen gewählt, um die Lastbilder biomechanisch sinnvoll miteinander zu synchronisieren. Bachmann (1988). Es werden konstante Schrittfrequenzen zwischen  $f_p = 0,8$  und  $2,5 \text{ Hz}$  untersucht.

##### 4.1.1 Gehen ohne TMD

Die Ergebnisse der Berechnungen ohne dämpfende Maßnahmen wurden nach den maximal auftretenden Beschleunigungen ausgewertet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die ermittelten Beschleunigungen in vertikaler ( $a_z$ ) und den horizontalen Richtungen ( $a_x, a_y$ ) über die zugehörigen Schrittfrequenzen  $f_p$  der Einwirkungen aufgetragen.

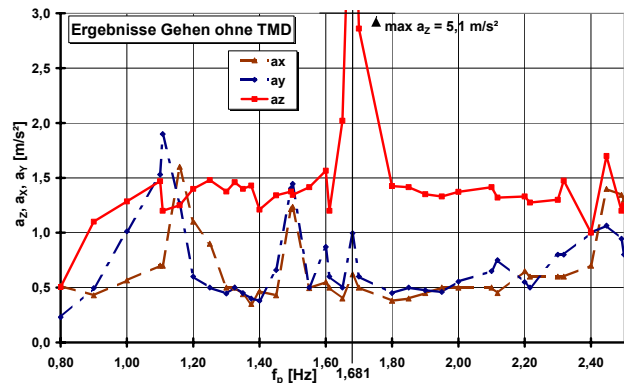


Abb. 7: maximale Beschleunigungen Gehen ohne TMD

Die angegebenen Maximalwerte der Beschleunigungen treten über einen Zeitraum von mehr als 30 s auf.

##### 4.1.2 Gehen mit TMD

Die Ergebnisse der numerischen Simulation mit TMD werden ebenfalls nach den Beschleunigungen ausgewertet, die zusätzlich für die maßgebenden Punkte des Tragwerks im Zeitbereich dargestellt werden.

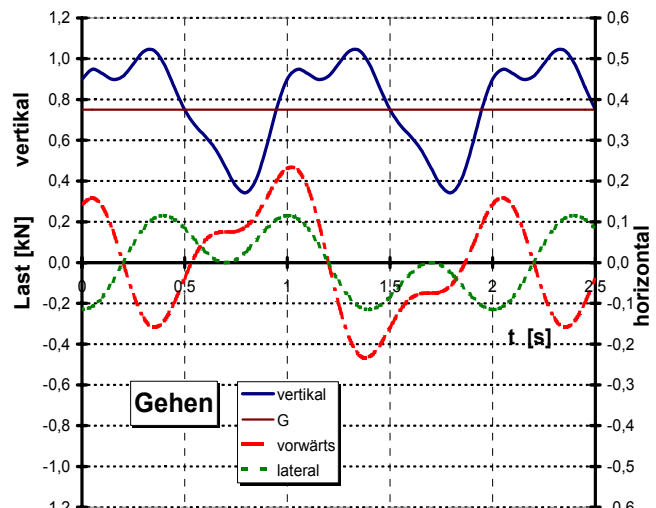


Abb. 8: Lastverläufe Gehen mit TMD

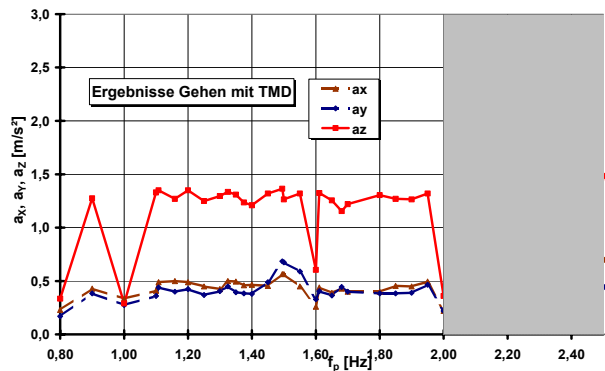


Abb. 8: maximale Beschleunigungen Gehen mit TMD

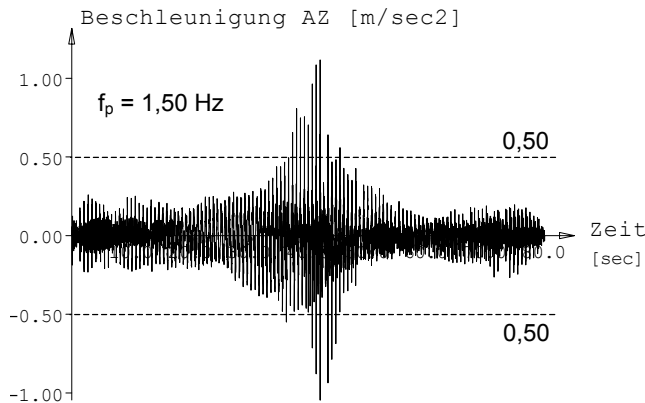


Abb. 9: Beschleunigung az (Knoten 53), Gehen mit TMD

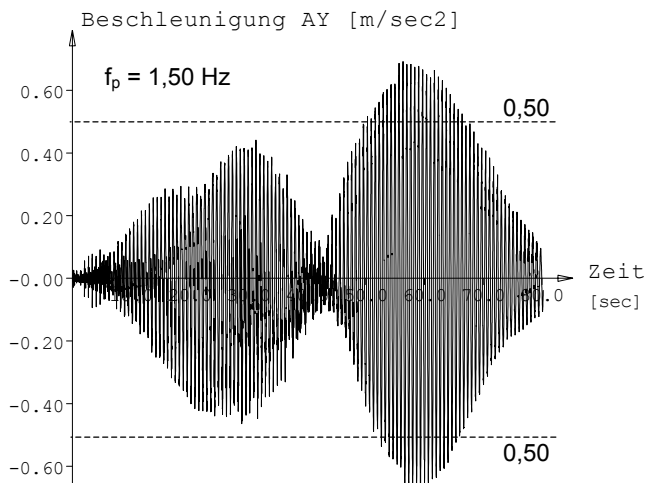


Abb. 10: Beschleunigung ay (Knoten 38), Gehen mit TMD

Man erkennt, dass das Beschleunigungsniveau der Maximalwerte nicht über einen großen Zeitraum erhalten bleibt.

## 4.2 Halbsinusmodell

Beim Treppensteigen können insbesondere bei hohen Schrittfolgen oder beim Hinabgehen stärkere Lasten auftreten als nach dem Lastmodell Gehen. Zur Abschätzung dieser Effekte werden Lasten nach dem Halbsinusmodell mit

einer Kontaktzeit gleich der halben Schrittperiode angesetzt ( $t_k = \frac{1}{2} T_p$ ). Govers et al. (2003).

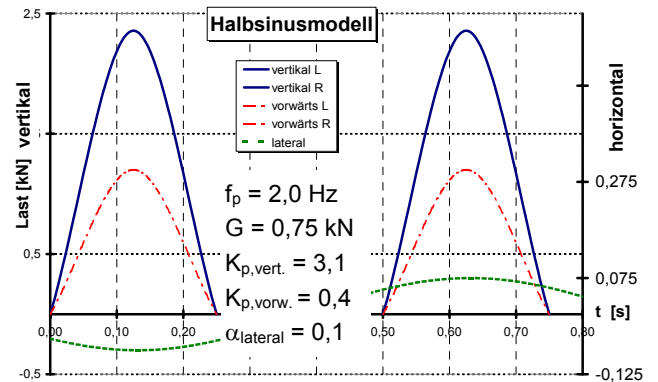


Abb. 11: Lasten des Halbsinusmodells

### 4.2.1 Halbsinusmodell ohne TMD

Die Ergebnisse werden wiederum nach den maximalen Beschleunigungen ausgewertet.

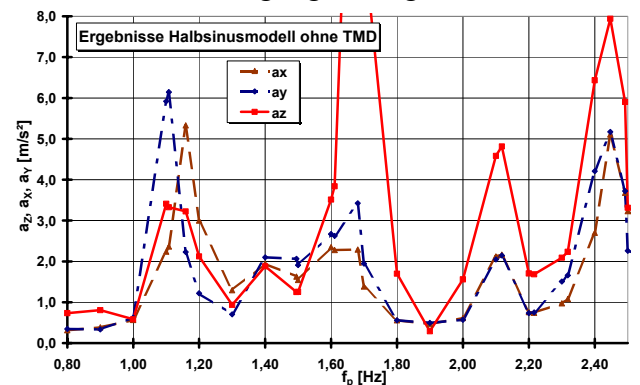


Abb. 12: Beschleunigungen Halbsinusmodell ohne TMD

Auch hier werden die Maximalwerte der Beschleunigungen über ein Zeitintervall von mindestens 30 s aufrechterhalten.

### 4.2.2 Halbsinusmodell mit TMD

Die Auswertung erfolgt wiederum nach den maximalen Beschleunigungen für die berechneten Schrittfolgen. Zusätzlich werden für die maßgebenden Punkte der Beschleunigungs-Zeitverlauf dargestellt.

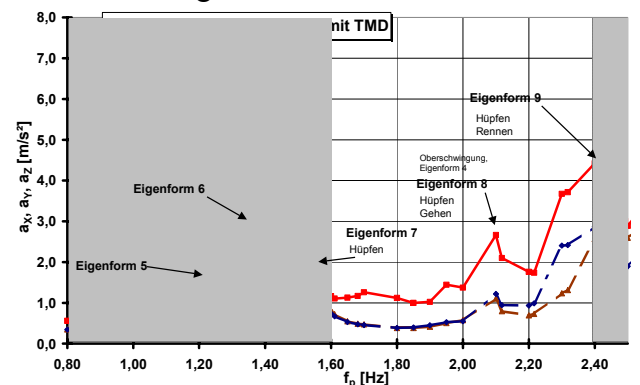


Abb. 13: Beschleunigungen Halbsinusmodell mit TMD

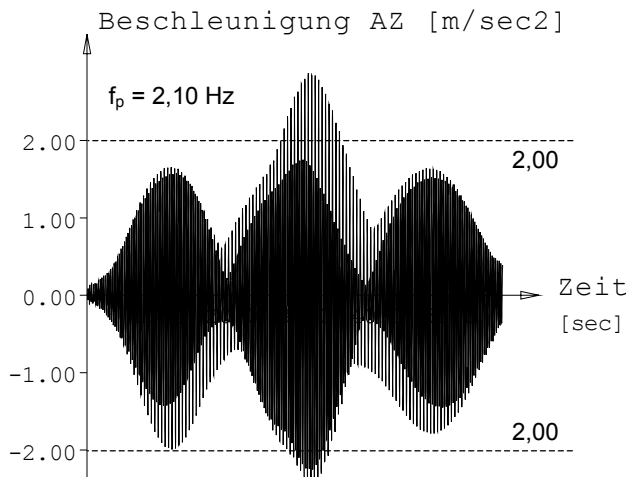


Abb. 14: az (Knoten 46), Halbsinusmodell mit TMD

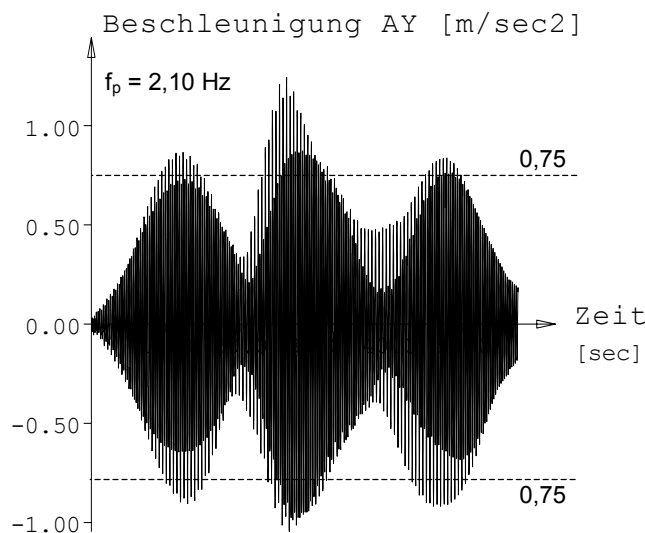


Abb. 15: ay (Knoten 31), Halbsinusmodell mit TMD

## 5 SCHWINGUNGSBEWERTUNG

Die Ergebnisse aus Kapitel 3.3.2 und Kapitel 4 sind hinsichtlich der vom Menschen tolerierbaren Beschleunigungen zu bewerten. Die zulässigen Beschleunigungswerte für Personen auf schwingenden Untergrund beim Gehen oder Stehen sind in Deutschland nicht normativ geregelt. In der Literatur findet man oft weit von einander abweichende Angaben. Einige Anhaltswerte werden hier zusammengefasst (Komfortgrenze | evtl. störend | kritisch):

Vertikalbeschleunigung : 0,5 | 1,0 | 3,5  
m/s<sup>2</sup>

Horizontalbeschleunigung: 0,1 | 0,5 | 2,0  
m/s<sup>2</sup>

Der Stufenabstand von etwa 0,42 m bedingt natürliche Schrittfrequenzen zwischen 0,8 und 1,6 Hz (Schneider 1991), was bei der angestrebten Nutzung plausibel erscheint. Für Schrittfrequenzen kleiner 1,6 Hz entsprechen die einwirkenden Lasten eher dem Lastbild Gehen. Die Lasten des Halbsinusmodells erwartet man ab einer Schrittfrequenz von 1,8 – 2,0 Hz, oder auch bei geringeren Frequenzen, falls der Fußgänger eine Schrittlänge von zwei oder mehr Stufen wählt.

### 5.1 Ohne Tilgersystem

Die Ergebnisse aus Kapitel 4.1.1 und 4.2.1 zeigen, dass bei einem ungedämpften System Schwingungen in vertikaler Richtung von 1,5 m/s<sup>2</sup> auch außerhalb des Resonanzbereichs zu erwarten sind. Für die 4. Eigenform ( $f_4 = 1,68$  Hz) besteht die Gefahr der Synchronisation mit der natürlichen Schrittfrequenz. In diesem Fall sind Resonanzschwingungen zu erwarten, die wegen der schlechten Dämpfungseigenschaften des Tragwerks erst nach sehr langer Zeit auf ein erträgliches Maß abklingen. Gleiche Effekte können für die horizontalen Schwingungsformen bei etwa 1,1 und 1,5 Hz Schrittfrequenz auftreten.

### 5.2 Mit Tilgersystem

– Gehen

Die Bewertung der Schwingungen im Bereich der Schrittfrequenzen bis maximal 1,8 Hz erfolgt nach dem Lastmodell Gehen. Hierbei werden fast im gesamten Schrittfrequenzbereich kurzzeitig maximale Vertikalbeschleunigungen von  $a_z = 1,3$  m/s<sup>2</sup> erreicht. Das Beschleunigungsniveau liegt aber im Mittel weit unter 0,5 m/s<sup>2</sup>. Abb. 9.

Horizontale Beschleunigungen von 0,5 m/s<sup>2</sup> können bei einer Schrittfrequenz von 1,5 Hz kurzzeitig überschritten werden. Ansonsten liegt das Beschleunigungsniveau deutlich unter 0,4 m/s<sup>2</sup>. Abb. 8, 10.

Die Ergebnisse sind für einen Fußgänger mit Schrittfrequenzen unterhalb von 1,8 Hz befriedigend. Die Schwingungen werden zwar für den Benutzer spürbar sein, jedoch nicht sonderlich beunruhigend.

Wird die Treppe durch mehrere Benutzer gleichzeitig begangen, so ist zu erwarten, dass sich höchstens drei Fußgänger ideal synchronisiert bewegen werden. Schneider (1991). Dabei würden sich die mittleren Beschleunigungsamplituden maximal verdreifachen. Dadurch könnten die Schwingungen für den Benutzer zwar

unangenehm, aber nicht gefährlich werden. Die Einzelpersonen können dem durch Stehen bleiben entgegenwirken. Die Schwingungen verringern sich innerhalb weniger Sekunden wieder auf ein erträgliches Maß.

Verweilen auf dem Kunstwerk Personen, die sich passiv verhalten, so wirken diese dämpfend gegen die angeregten Schwingungen und verhindern mit ihrer Sperrwirkung eine weitere Anregung.



Abb. 16: Fertigung des Kunstwerks

#### – Schnelles Gehen, Rennen, Hüpfen

Betrachtet man die Ergebnisse des Halbsinusmodells, so ist ersichtlich, dass die Oberschwingungen durch den wesentlich größeren Stoßfaktor der 2. Harmonischen der Vertikallast angeregt werden.

Die Anregung der Eigenformen 5 und 6 ist unwahrscheinlich. Eigenform 7 könnte durch Hüpfen an geeigneter Stelle angeregt werden. Die dabei möglichen Beschleunigungen bleiben aber im unkritischen Bereich.

Eigenform 8 kann durch schnelles Gehen besonders beim Hinablaufen angeregt werden. Die vertikalen und horizontalen Beschleunigungen können dabei als unangenehm empfunden werden, bleiben aber unkritisch. Eine Synchronisation der Schrittfrequenz mit der 8. Eigenfrequenz ist nicht zu erwarten. Die Anpassung der Schrittfrequenz mit der 2. harmonischen der Vertikallasten an die Bauwerksfrequenz wurde bis jetzt in der Literatur nicht beobachtet. Der Benutzer kann diesen Schwingungen wiederum durch langsames Fortbewegen oder Stehen bleiben entgegenwirken. Die Schwingungen reduzieren sich innerhalb von ca. 5-10 s auf ein erträgliches Niveau. Sollte sich die Anregung der 8. Eigenform als signifikant störend heraus-

stellen, können die Vertikaltilger V1 durch Austausch der Druckfedern und Anpassung der Dämpferflüssigkeit auf diese Eigenfrequenz abgestimmt werden und somit die Schwingungen weiter erheblich reduzieren.

Bewegen sich die Personen auf der Treppe mit einer Schrittfrequenz von mehr als 2,3 Hz (Rennen), so können weitere, höhere Eigenformen angeregt werden. Die dabei auftretenden Beschleunigungen sind als deutlich unangenehm zu bewerten. Bevor es zu einem Stabilitätsproblem für den Benutzer kommt, kann dieser wiederum durch Stehen bleiben bzw. durch langsames Gehen die Schwingungen abbauen.



Abb. 17: Das Kunstwerk mit den Verfassern

#### – Fazit

Durch die vorgesehenen TMD werden die zu erwartenden Schwingbeschleunigungen bei planmäßiger Nutzung auf ein befriedigendes Maß reduziert. Für Einzelpersonen können gängige Komfortkriterien eingehalten werden.

Wird das Kunstwerk durch gezielte Anregung wie z.B. Hüpfen oder synchrones Gehen mehrerer Personen angeregt, können deutlich spürbare Schwingungen auftreten. Die zugehörigen Beschleunigungen nehmen aber keine kritischen oder gefährlichen Werte an. Der oder die Benutzer können den evtl. unangenehmeren Schwingungen durch entsprechendes Verhalten entgegenwirken. Die Standsicherheit der Struktur ist nicht gefährdet.

Bei unbeabsichtigter Benutzung wie z.B. fortwährendes Rennen, Überspringen von ein oder mehr Stufen, synchrones Hüpfen mehrerer Personen etc., können sehr unangenehme Schwingungen auftreten. Die Maßnahme bietet, wie auch bei einigen Fußgängerbrücken der Fall, keinen Schutz gegen Vandalismus. Die

Standsicherheit wäre nur im Falle mutwilliger Anregung durch eine Anzahl von 50 oder mehr Personen auf dem Kunstwerk bei idealer Koordination gefährdet. Dieses Szenario wird erfahrungsgemäß nicht eintreten.

Erst der Einsatz der TMD in der hier beschriebenen Form ermöglicht es dem Künstler, seine Idee des begehbaren Kunstwerks in die Realität umzusetzen.

## LITERATUR

Bachmann, H., et al. (1997), *Vibration Problems in Structures*, Birkhäuser Verlag, Basel.

Bachmann, H. (1988), *Schwingungsprobleme bei Fußgängerbauwerken*, *Bauingenieur* 63, 67-75.

Den Hartog, J. P. (1984), *Mechanical Vibrations*, Dover Publications, New York.

Dallard, P., et al. (2001), *The London Millennium Footbridge*, *The Structural Engineer* 79, 17-33.

Govers, Y., et al. (2003), *Menscheninduzierte Schwingungen bei Treppenkonstruktionen – Eine Lücke in deutschen Normen?* *Baudynamik*, VDI-Berichte 1754.

Kasperski, M. (2003), *Entwurfsvorgaben für Tribünen- und Deckenkonstruktionen unter menscheninduzierten lasten*, *Baudynamik*, VDI-Berichte 1754.

Kasperski, M. (2001), *Menschenerrechte Schwingungen in Sportstadien*, *Bauingenieur* 76, 575-581.

Petersen, C. (2001), *Schwingungsdämpfer im Ingenieurbau*, Maurer Söhne GmbH & Co. KG, München.

Petersen, C. (2000), *Dynamik der Baukonstruktionen*, Vieweg & Sohn, Braunschweig.

Schneider, M. (1991), *Ein Beitrag zu fußgängerinduzierten Brückenschwingungen*, *Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau*, Technische Universität München.