

Experimentelle Untersuchung und numerische Modellierung fußgängerinduzierter Schwingungen von Schrägakabelfußgängerbrücken

Christoph Maulhardt¹, Ronald Stein¹

Zusammenfassung: Schrägakabelfußgängerbrücken können leicht zu Schwingungen angeregt werden. Um mögliche schwingungstilgende Maßnahmen zu vermeiden bzw. diese effektiv planen zu können, ist eine genaue Kenntnis des dynamischen Verhaltens notwendig. Zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens, besonders im Bereich großer Amplituden, wurden Messungen und numerische Simulationen durchgeführt.

Abstract: Cable-stayed footbridges can easily be excited into vibrations. An accurate knowledge of dynamic behavior is necessary for the effective planning of mass-damping measures, or to avoid them altogether. With particular emphasis on large amplitudes, measurements and numerical simulations were conducted to assess the vibrational behavior.

1 Einleitung

Fußgängerbrücken sollen heute nicht nur funktional, tragfähig und dauerhaft sein. Beim Entwurf wird meist eine architektonisch ansprechende, schlanke Konstruktion gefordert, da die Überführungen oft städtebaulich exponiert gelegen sind. Fuß- und Radwegbrücken können aufgrund ihrer geringen Verkehrslasten sowie dem Einsatz innovativer Materialien mit großen Stützweiten gebaut werden. Für mittlere und große Spannweiten eignen sich hochfeste Elemente wie Seile, die sehr schlanke Konstruktionen ermöglichen. Diese Brücken haben ein geringes Eigengewicht, sodass sie durch Passanten leicht zu Schwingungen angeregt werden können. Bei seilverspannten Brücken (Schrägseil-, Hängebrücken o. ä.) können zusätzlich zu den Schwingungen des Überbaus Seilschwingungen auftreten. Die Seilbewegungen und das Schwingungsverhalten des Überbaus beeinflussen sich wechselseitig.

Menscheninduzierte Schwingungsprobleme sind bei Fußgängerbrücken in aller Regel Gebrauchstauglichkeitsprobleme. Ist eine Brücke (oder sind Brückenseile) durch große Bewegungen gekennzeichnet, wird der Nutzerkomfort eingeschränkt. Die Passanten sind

¹ Dipl.-Ing., GMG Ingenieurgesellschaft mbH Dresden

verunsichert, was eine kostenintensive Sanierung durch Schwingungstilger zur Folge haben kann.

Die gegenwärtigen Normenansätze beschreiben die realen Fußgängerlasten nur sehr vereinfachend. Es werden meist harmonische Ansätze gewählt und es erfolgt eine pauschale Extrapolation der Tragwerksantworten infolge Belastung durch Fußgängergruppen aus den Ergebnissen von Einzelfußgängern. Um das Schwingungsverhalten nichtlinearer Systeme realitätsnah einschätzen zu können, wurden Messungen und numerische Simulationen am Beispiel von zwei Schrägkabelfußgängerbrücken durchgeführt.

Die dynamischen Eigenschaften der Tragwerke sind durch eine Interaktion von Seil- und Überbauschwingungen gekennzeichnet. Seile besitzen ein nichtlineares Tragverhalten, die Normalkräfte und Verformungen sind nicht proportional zur Belastung. Die Seilkräfte wirken in den Überbau zurück, sodass eine Kopplung von einzelnen Schwingungssystemen vorliegt. Das Gesamttragwerk verhält sich insbesondere bei großen Amplituden nichtlinear, die Eigenfrequenzen des Systems verschieben sich. Dabei sind große Seilverformungen zu beobachten. Da die Steifigkeit von Seilen bei großen Verformungen zunimmt, ist es nicht möglich, Schwingungseigenschaften im Bereich großer Amplituden aus Messungen oder Simulationen bei geringer Belastungsintensität abzuleiten. Extrapolationen aus Messungen bei geringer Belastungsintensität führen zu einer ungünstigen Bewertung des Schwingungsverhaltens für große Amplituden.

2 Seile

2.1 Statische Eigenschaften

Seile verhalten sich auch im Gebrauchszustand nichtlinear. Zieht man an einem durchhängenden Seil (Bild 1), lässt es sich zunächst schnell „straff“ ziehen. Der Durchhang verringert sich, wobei sich die Seilkraft S kaum ändert. Wenn der Durchhang sehr gering ist, führt eine weitere Verschiebung des Aufhängungspunktes zu einer Dehnung des Seiles, die Seilkraft wächst überproportional an. Das Seil versteift sich. Der Anstieg der in Bild 1 dargestellten Kurve nennt man in den Bereichen mit relativ großem Durchhang „Durchhangmodul“, bei starker Vorspannung geht er in den Elastizitätsmodul des Seiles über.

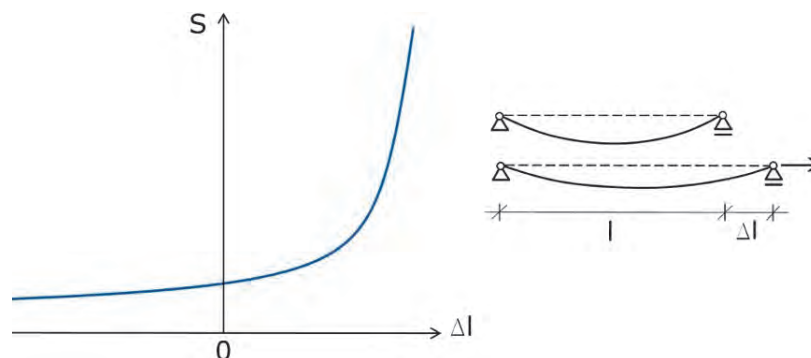


Bild 1: Nichtlineares Tragverhalten von Seilen

Fig. 1: Nonlinear behaviour of ropes

Bei Schrägseilbrücken sind Seile Haupttragglieder. Das nichtlineare Verhalten wirkt sich auf den Überbau aus, sodass sich das gesamte Tragwerk (statisch und dynamisch) nichtlinear verhält.

2.2 Dynamische Eigenschaften

Für straff gespannte, lange Seile (ideale Saite) ist eine einfache Ermittlung der Seilkräfte über die Eigenfrequenzen möglich. Aus Messung der ersten Eigenfrequenz (EF) kann die Seilkraft errechnet werden.

Für durchhängende Seile können diese einfachen Beziehungen nicht mehr angewendet werden. Die Seileigenfrequenzen in und aus der Seilebene (SE) sind aufgrund des nicht vernachlässigbaren Durchhangs unterschiedlich. Außerdem ist die Abfolge der Eigenfrequenzen nicht mehr konstant.

Ein dynamisches Phänomen bei Seilen ist die sog. Parametererregung. KOVÁCS [1] untersuchte dieses Phänomen bei Schrägseilbrücken und bestätigte, dass die größten Schwingungsamplituden bei dem Eigenfrequenzverhältnis $f_{\text{Brücke}} : f_{\text{Seil}} = 2 : 1$ auftreten. Bei diesem Frequenzverhältnis, bezeichnet als Parameterresonanz, kommt es zu größeren Amplituden als beim Verhältnis $1 : 1$ (Resonanz). Dies ist wie folgt zu begründen: Das Seil wird innerhalb seiner Schwingperiode durch die doppelt so schnelle Fußpunktbewegung zweimal angeregt. Somit wird deutlich mehr Energie zugeführt [2]. Bei Schrägseilbrücken können die Seile durch Überbau- oder Pylonschwingungen angeregt werden. Da es sich um ein nichtlineares Schwingungsphänomen handelt, kommt es nicht zum unbegrenzten Aufschaukeln.

Weiterhin können Seile bei Fußpunktanregung in räumliche Schwingungsbewegungen versetzt werden (Bild 2).

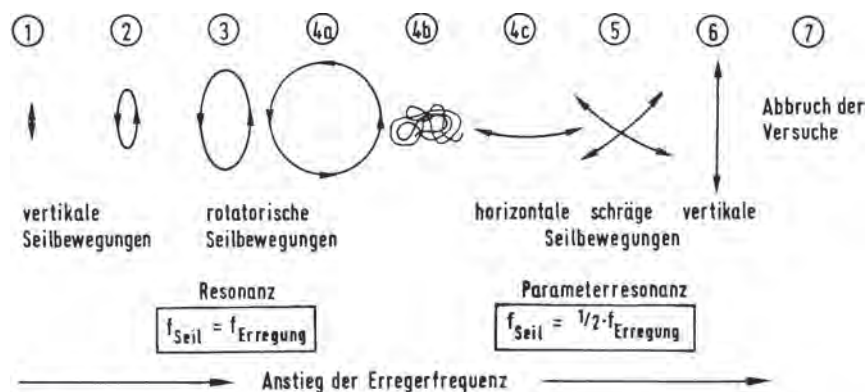


Bild 2: Räumliche Seilbewegungen [2]

Fig. 2: Spatial rope movements [2]

Bei Erregerfrequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz bewegen sich die Seile vertikal in der Seilebene. Wird die Frequenz gesteigert, ergibt sich eine rotatorische, zunächst hocheliptische, bei Erreichen einer bestimmten Frequenz im Resonanzbereich eine kreisförmige Bewegung. Es handelt sich um eine Instabilität. Der Grundzustand (Vertikalbewegung) ist gestört und eine andere Schwingform tritt auf [3]. Wie in Bild 2 ersichtlich, bricht die stabile

vertikale Bewegung zusammen und geht in (4b) in eine chaotische Bewegung über, um sich bei weiterer Erhöhung der Frequenz stabil in horizontaler Richtung zu bewegen, wobei das Seil in der halben Erregerfrequenz schwingt. Es handelt sich um Parameterresonanz. Kurz vor Erreichen der doppelten Frequenz der ersten vertikalen Eigenfrequenz (in Seilebene) kommt es zu einer schrägen Bewegung, die bei Erreichen des Hauptinstabilitätsbereiches wiederum in eine Vertikalbewegung, verbunden mit sehr großen Amplituden, übergeht [2].

3 Fußgängerinduzierte Lasten

Fußgängerbrücken werden durch das Gewicht der Passanten in verschiedener Weise belastet. Aufgrund des Kontaktes der Füße mit dem Brückenbelag wirken dynamische Lasten auf das Bauwerk. Diese sogenannten „Bodenreaktionskräfte“ können bei den Fortbewegungsarten Gehen, Joggen bzw. Laufen, Rennen, Hüpfen oder Wippen entstehen.

Beginnt eine Fußgängerbrücke zu schwingen, beeinflusst dies ab einer bestimmten Schwingungsamplitude das Fortbewegungsverhalten. Personen können durch Überbauschwingungen aus ihrem natürlichen Takt gebracht werden, sodass sie ihr Verhalten, bei kleineren Amplituden auch unbewusst, ändern, ihre Schrittfrequenz variieren oder sich bei großen Amplituden am Geländer festhalten, was zu einer Reduzierung der Amplituden führt. Übereinstimmend wird in der Literatur [4]–[6] eine starke Abhängigkeit des Lastverlaufes beim Gehen und Joggen von der Schrittfrequenz belegt (Bild 3).

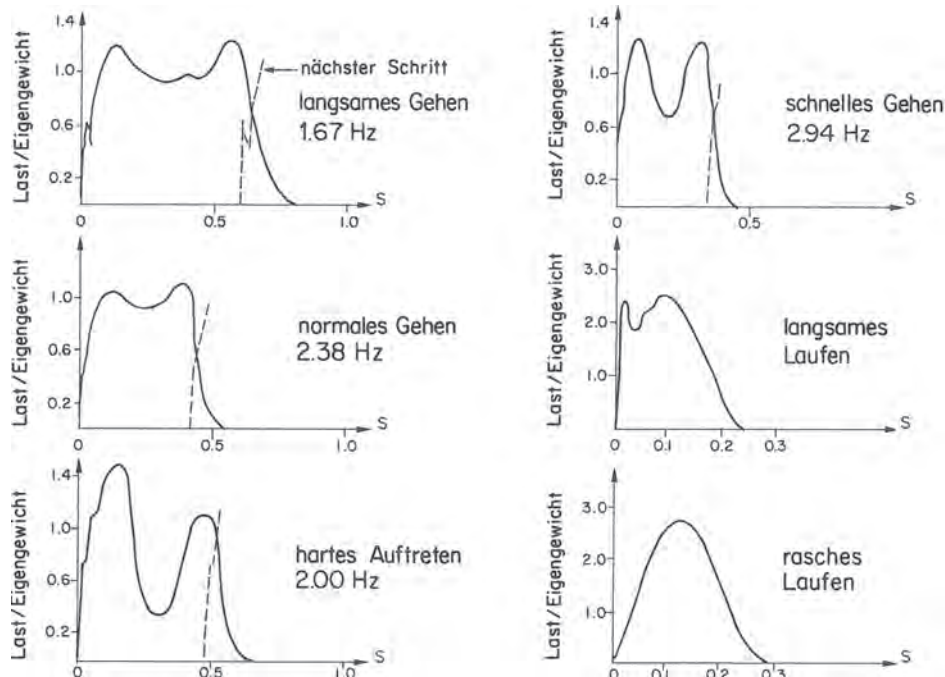


Bild 3: Zeitverlauf fußgängerinduzierter Lasten [4]

Fig. 3: Time histories of human-induced loads [4]

Die normale Schrittfrequenz liegt zwischen 1,6 und 2,4 Hz mit einem Mittelwert bei etwa 1,9 bis 2,0 Hz [5]. Nach [4] liegen die Schrittfrequenzen beim Laufen bei 2,4 bis 2,7 Hz, beim Rennen bis 5,0 Hz.

4 Schwingungsmessungen

Alle Messungen erfolgten mit mehreren kapazitiven Beschleunigungsaufnehmern, die jeweils in Seilebene und orthogonal dazu angeordnet wurden (Bild 4) [7].



Bild 4: Uniaxiale Beschleunigungssensoren, in und aus der Seilebene messend [7]

Fig. 4: Uniaxial accelerometers measuring in-plane and out-of-plane [7]

Zunächst wurden alle In-plane- (in Seilebene) und Out-of-plane- (aus der Seilebene) Seileigenfrequenzen sowie die Überbaueigenfrequenzen gemessen. Danach erfolgten verschiedene Messungen mit Anregung durch eine oder mehrere Personen (bis zu 12) in verschiedenen Bewegungsarten. Zur besseren Synchronisation der Personen untereinander sowie zur Abstimmung mit den Eigenfrequenzen des Versteifungsträgers und der Seile wurde ein Metronom verwendet. Bei den erreichten Beschleunigungen (bis zu 8 m/s^2) war aufgrund der Größe der Amplitude deutlich ein „Aus-dem-Takt-kommen“ zu beobachten. Ab Beschleunigungen von 3 bis 4 m/s^2 war keine synchronisierte Anregung mehr möglich.

4.1 Brücke über die B 170, BW 3.2 in Dresden

Die Brücke über die B170, BW 3.2, befindet sich im Süden Dresdens zwischen der Anschlussstelle zur Bundesautobahn A17 und dem Knotenpunkt Kohlenstraße/Südhöhe. Die Geh- und Radwegbrücke wurde im Jahr 2004 fertiggestellt und überspannt die vierspurige Bundesstraße B170 sowie eine Auffahrtsstraße mit einer Gesamtlänge von 60 m. Der Überbau wird durch sechs Seile gehalten, wobei die Seile in Achse 20 und 30 mit dem Versteifungsträger verbunden sind (Bild 5). Die anderen zwei Seile sind als Abspannseile am Widerlager verankert.

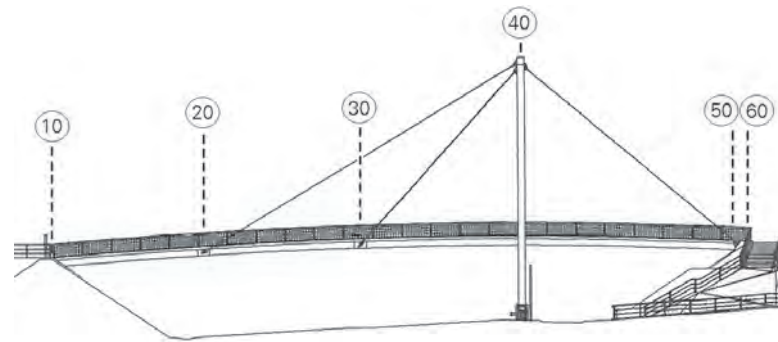


Bild 5: Längsansicht der Brücke über die B170 (BW 3.2)

Fig. 5: Elevation of the bridge over B170 (BW 3.2)

4.2 Ergebnisse der Messungen

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Eigenfrequenzmessungen. Hierbei steht N für Norden und S für Süden. Es ist auffällig, dass die beiden Seile pro Achse teilweise größere Differenzen aufweisen, was durch ein unterschiedliches Vorspannen, aber auch durch Temperaturunterschiede zu erklären ist.

Tabelle 1: Gemessene Seileigenfrequenzen, Seillänge und Seilkraft

Table 1: Measured rope eigenfrequencies, rope length and rope force

Seil Nr.	Seillänge [m]	$f_{E,i}$ in SE [Hz]			$f_{E,i}$ aus SE [Hz]			Seilkraft [kN]
		1.	2.	3.	1.	2.	3.	
A 20 S	30,58	1,81	2,86	3,81	0,91	1,84	2,82	35,0
A 20 N		1,52	2,11	3,25	1,05	2,14	3,25	53,0
A 30 S	19,66	3,15	6,33	9,60	3,16	6,37	9,64	170,9
A 30 N		2,98	6,03	9,16	2,97	6,03	9,16	151,9
A 50 S	22,36	2,77	5,53	8,36	2,79	5,64	8,51	171,6
A 50 N		3,08	6,16	9,30	3,12	6,29	9,48	213,4

Bei den Seilen in Achse 30 und 50 unterscheiden sich die Eigenfrequenzen in und aus der Ebene nur geringfügig. Hier ist die Saitentheorie anwendbar. Für die schlaffen Seile in Achse 20 trifft dies nicht zu. Besonders die niedrigen Eigenfrequenzen variieren stark. Der Abstand der Eigenfrequenzen über der Ordnung ist nicht konstant. Für den Überbau konnte die erste, sehr dominante vertikale Überbaueigenfrequenz zu 2,27 Hz ermittelt werden. Vergleicht man den Wert von 2,27 Hz mit den Seileigenfrequenzen in Tabelle 1, ist erkennbar, dass $f_{E,2}$ von Seil 20 N (in SE) mit 2,11 Hz nah an der Überbaueigenfrequenz liegt. Das Seil schwingt deutlich in seiner ersten antimetrischen Eigenform mit.

Weiterhin wurde die Dämpfung des Überbaus und der Seile bestimmt. Diese ist amplitudenabhängig. Die Dämpfung steigt bei größer werdenden Amplituden. Für den Überbau schwankt das LEHR'sche Dämpfungsmaß zwischen 0,5 und 1 %. Es handelt sich somit um

ein sehr schwach gedämpftes Tragwerk. Die sehr stark schwingenden Seile in Achse 20 besitzen ein Dämpfungsmaß von 0,2 bis maximal 1 %. Bei den anderen Seilen beträgt das Dämpfungsmaß ca. 0,1 %.

Bild 6 zeigt Signalverläufe für den Überbau im Schwingungsbauch (ca. 3 m von Achse 20 entfernt in Richtung Achse 30) und die Seile in Achse 20 in SE (positive Beschleunigungen sind nach unten gerichtet).

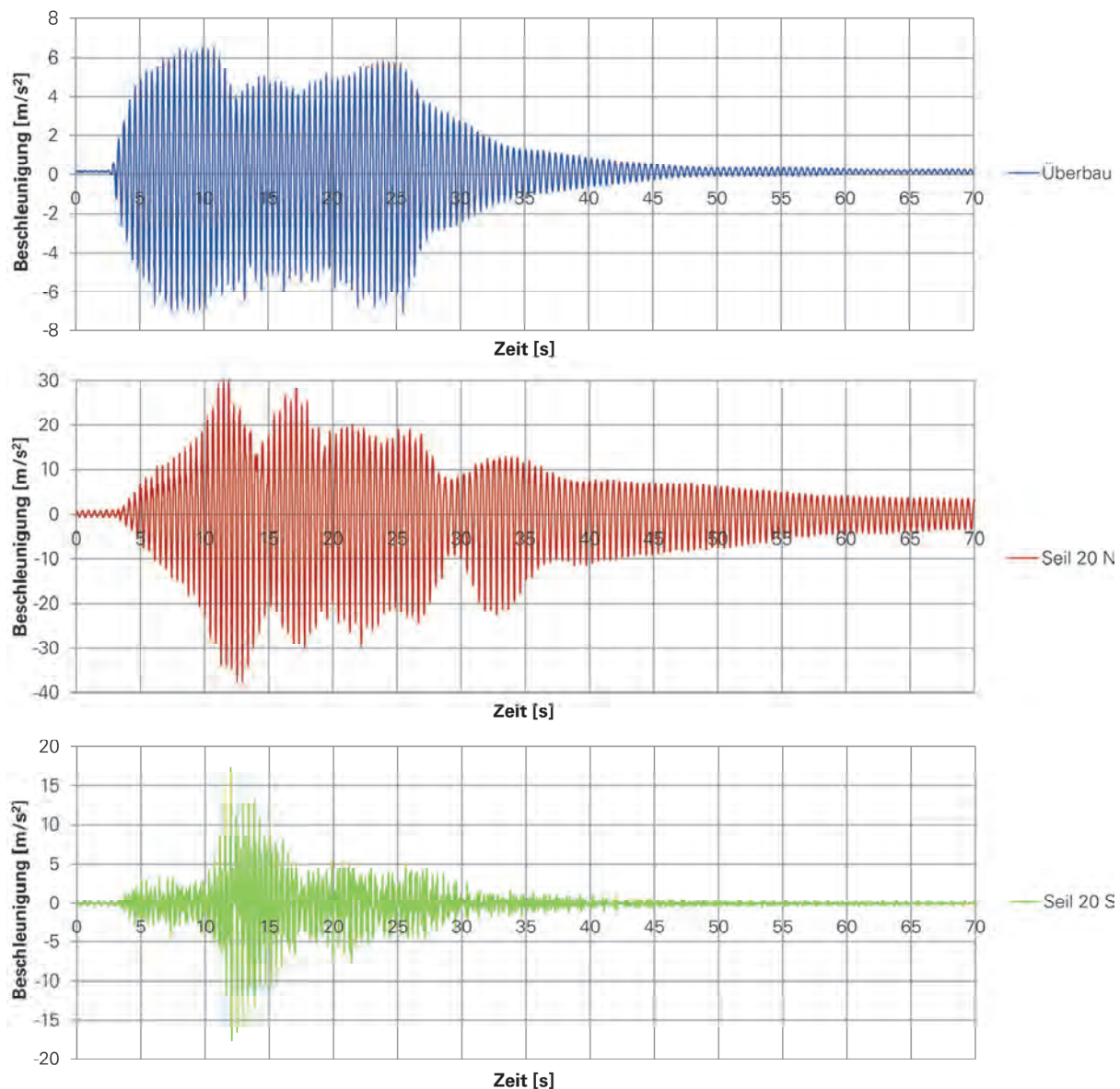


Bild 6: Gemessene Beschleunigungssignale für Überbau, Seil 20 N und Seil 20 S; Anregung durch Hüpfen von 12 Personen (Ende der Anregung bei 27 s) [7]

Fig. 6: Measured acceleration signals of girder, rope 20 N and rope 20 S; excitation by bouncing of 12 people (end of excitation at 27 sec.) [7]

Auffällig ist, dass die Überbauamplituden schnell wachsen. Danach bleiben sie stabil bzw. sinken leicht ab. Das begrenzte Anwachsen ist zum einen dadurch zu erklären, dass die Personen bei großen Beschleunigungen des Versteifungsträgers aus dem Takt kommen. Zum anderen setzt die Systemdämpfung ein. Die Seile (in diesem Fall Seil 20 N) benötigen etwas mehr Zeit, um einzuschwingen und große Amplituden zu erreichen. Danach „bremsen“ die Seile den Überbau ab, wodurch die Amplituden kleiner werden. Nach einem bestimmten Zeitraum ist die Phasenlage der beiden Schwingungen so, dass es eher zu einem Aufschaukeln kommt. Dies mündet in dem Überbaumaximum bei etwa 24 s.

Da sich die Eigenfrequenzen im Zeitverlauf ändern, wäre auch bei ideal gleichbleibender Anregungsfrequenz eine Dämpfung durch die Belastung vorstellbar. Die Phasenlage zwischen Überbauschiwingung und Erregung ist nicht konstant. Dies hat teilweise eine Anregung, aber auch eine Abschwächung zur Folge. Eine Unterscheidung zwischen der Anregung (bzw. dem Abschwächen) durch die Fußgänger und der Erregung (oder dem Abschwächen) durch die Seilschwingungen ist nicht möglich. Nach dem zweiten Maximum sinken die Amplituden erneut. Die Erregung wird aber erst bei ca. 27 s beendet. Die Überbauamplituden sinken danach relativ schnell, die Seilamplituden langsamer. Bild 6 zeigt zudem, dass sich das Seil 20 S unregelmäßig bewegt. Die Überbaueigenfrequenz liegt nicht im Bereich einer In-plane-Seileigenfrequenz, sodass kein klares Frequenzspektrum aus dem Messsignal ermittelt werden kann. Die Amplituden sind nur etwa halb so groß wie bei Seil 20 N. Beim Seil 20 N wird der Effekt des „Durchschwingens“ sichtbar. Die negativen Beschleunigungen (entgegen der Schwerkraft) sind deutlich größer als die positiven.

Aus den Beschleunigungssignalen eines Messpunktes in und aus der Seilebene kann durch Integration der räumliche Verschiebungsverlauf berechnet werden. Bild 7 zeigt einen Bewegungsverlauf des Seiles 20 N: Zu Beginn bewegt sich das Seil ausschließlich vertikal. Innerhalb von wenigen Sekunden ändert sich die Bewegungsrichtung. Es kommt kurzzeitig zu unregelmäßigen Bewegungen. Danach wird eine stabile Bewegungsrichtung erreicht. Diese ändert sich ab ca. 7 s nicht mehr. Nur die Amplitudengröße steigt bzw. sinkt. Durch eine laterale Anregung wird eine kleine Störung aufgebracht, wodurch das Seil nicht mehr ausschließlich in der Ebene schwingen kann. Es verlässt seine ursprüngliche Bewegung und geht in einen stabilen Nachbarzustand über.

5 Numerische Simulationen

Die untersuchten Brücken werden als Stabwerke mit dem Programm SOFiSTiK modelliert (Bild 8). Für eine realitätsnahe Schwingungsanalyse ist es erforderlich, ausreichend viele Zwischenknoten bei den Seilelementen einzufügen, um so die höheren Seileigenformen abbilden zu können. Außerdem werden die Randbedingungen (Federsteifigkeiten der Auflagerungen) so variiert, dass es eine gute Übereinstimmung zu den gemessenen Eigenfrequenzen gibt.

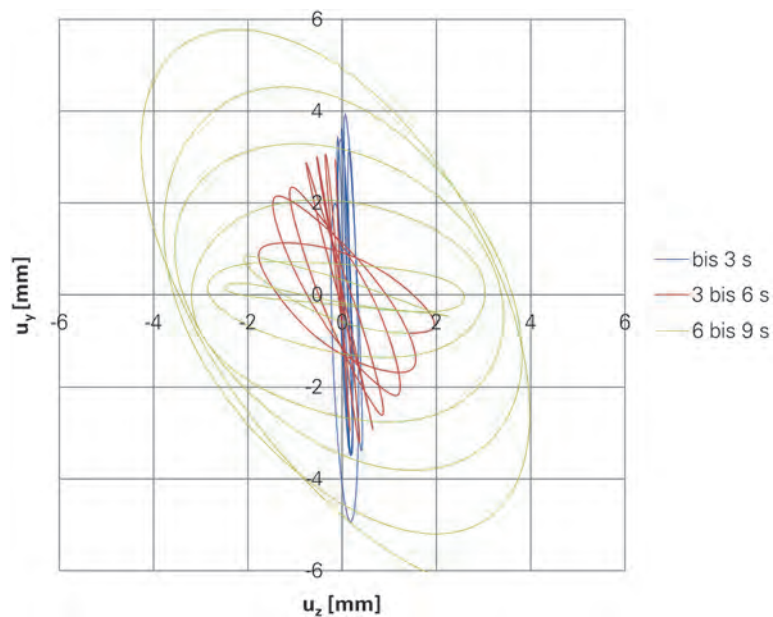


Bild 7: Gemessene räumliche Seilbewegungen des Seiles 20 N; Anregung durch Joggen einer Person (2,27 Hz) [7]

Fig. 7: Measured spatial rope movements of rope 20 N; excitation by running of one person (2,27 Hz) [7]

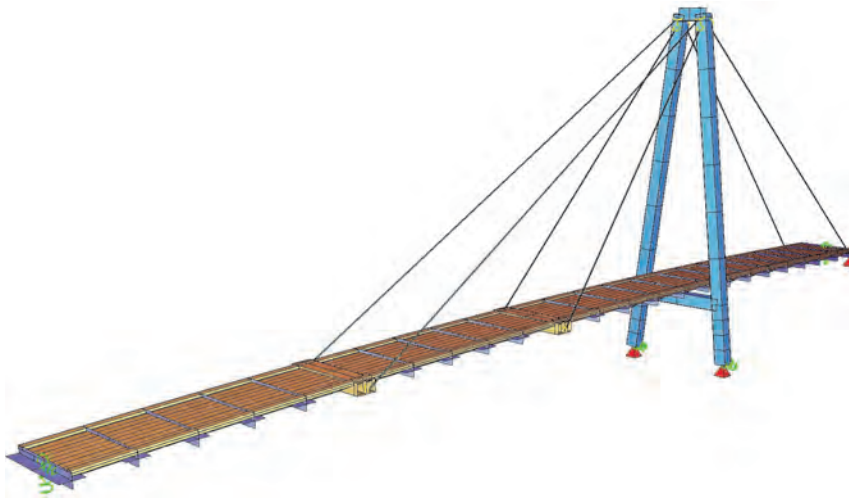


Bild 8: Numerisches Modell der Brücke über die B170

Fig. 8: Numerical model of the bridge over B170

Die Belastung wird in Form von Halbsinusimpulsen aufgebracht (siehe „rasches Laufen“ in Bild 3), d. h. eine Person läuft oder hüpf „virtuell“ über bzw. auf der Brücke. Dabei wird sichtbar, dass eine Implementierung einer sog. „Sattelfunktion“ (siehe „hartes Auftreten“ in Bild 3) keine wesentlichen Vorteile im Vergleich zwischen Messung und Simulation ergibt.

Dennoch ist eine Anpassung der Parameter Schrittlänge, Stoßfaktor (Verhältnis zwischen maximaler dynamischer Last und statischer Last), Schrittfrequenz, Bodenkontaktzeit erforderlich, um die gemessenen Ergebnisse möglichst gut nachvollziehen zu können. Außerdem sind die Implementierung einer amplitudenabhängigen Dämpfung und die Zuweisung unterschiedlicher Dämpfungsmaße für die einzelne Tragwerksteile von Vorteil. Die Tragwerksantworten werden durch eine numerische Zeitschrittberechnung nach Theorie 3. Ordnung (große Verformungen der Seile) berechnet.

6 Vergleich zwischen Messung und Simulation

Nach Anpassung der beschriebenen Parameter konnte eine hohe Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen erzielt werden (Bild 9). Dabei können die Stoßfaktoren aus der Literatur (z. B. [4]) für Einzelpersonen bestätigt werden. Durch Asynchronitäten und ein „Aus-dem-Takt-kommen“ bei großen Amplituden sinken die dynamischen Vergrößerungsfaktoren deutlich, wenn das Tragwerk durch mehrere Personen angeregt wird.

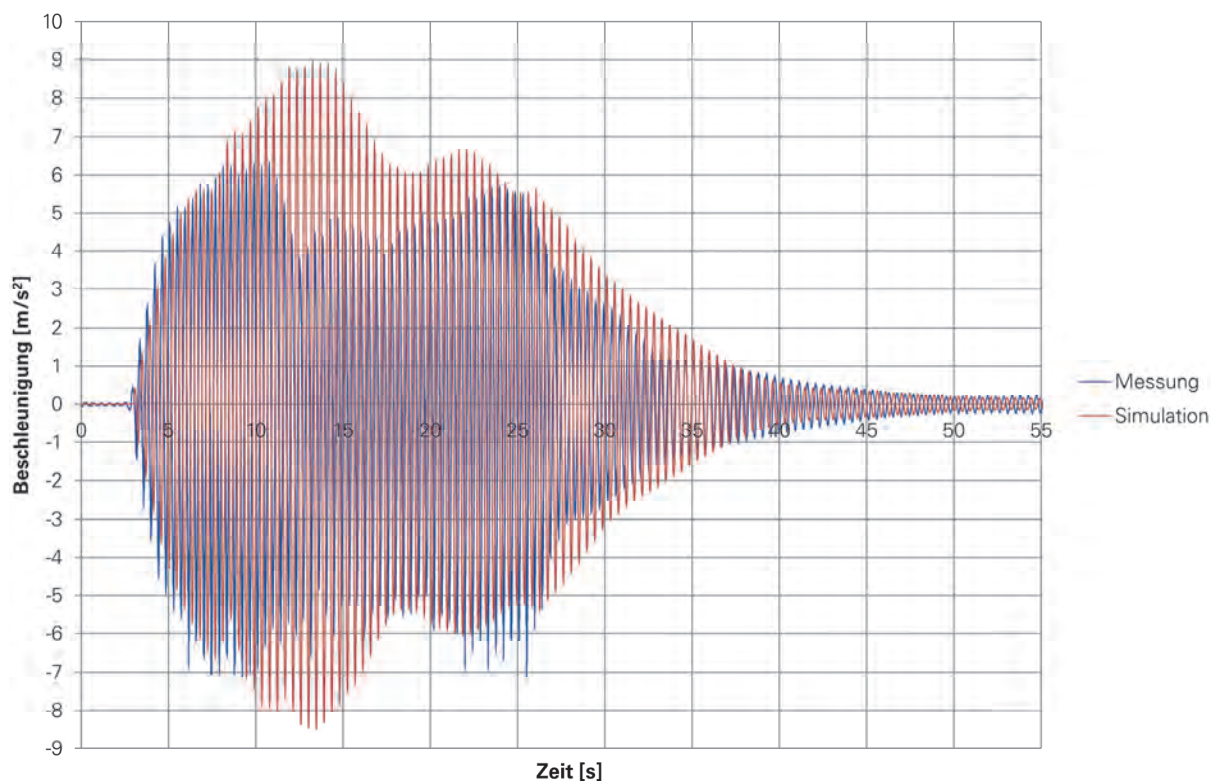


Bild 9: Vergleich der Überbauschwingungen zwischen Messung und Simulation; Anregung durch Hüpfen von 12 Personen im Schwingungsbauch der ersten Überbaueigenfrequenz (2,27 Hz) [7]

Fig. 9: Comparison between the measured and simulated signal of the girder vibrations; excitation by bouncing of 12 people in antinode of the first girder eigenfrequency (2,27 Hz) [7]

Die Zeitschrittberechnung überschätzt die Tragwerksreaktion des Überbaus leicht. Der Anstieg der Amplitude ist nahezu kongruent, in der Messung ist das Maximum etwas schneller erreicht. Dies hängt mit dem beschriebenen „Aus-dem-Takt-kommen“ zusammen. Bei beiden Kurven treten zwei ausgeprägte Maxima auf (in der Messung bei ca. 11 und 25 s, in der Rechnung bei 13 und 23 s).

7 Einflussfaktoren

Um möglichst allgemein gültige Aussagen treffen zu können, werden im Modell verschiedene System- und Lastparameter variiert.

Da es sich bei Schrägseilfußgängerbrücken um schwach gedämpfte Tragwerke handelt (schmaler Frequenzbereich in dem Resonanzerscheinungen auftreten können), besitzt die Erregerfrequenz großen Einfluss auf die Amplituden und Zeitverläufe. Eine geringe Änderung hat qualitativ und quantitativ große Auswirkungen auf die Tragwerksantwort (Bild 10).

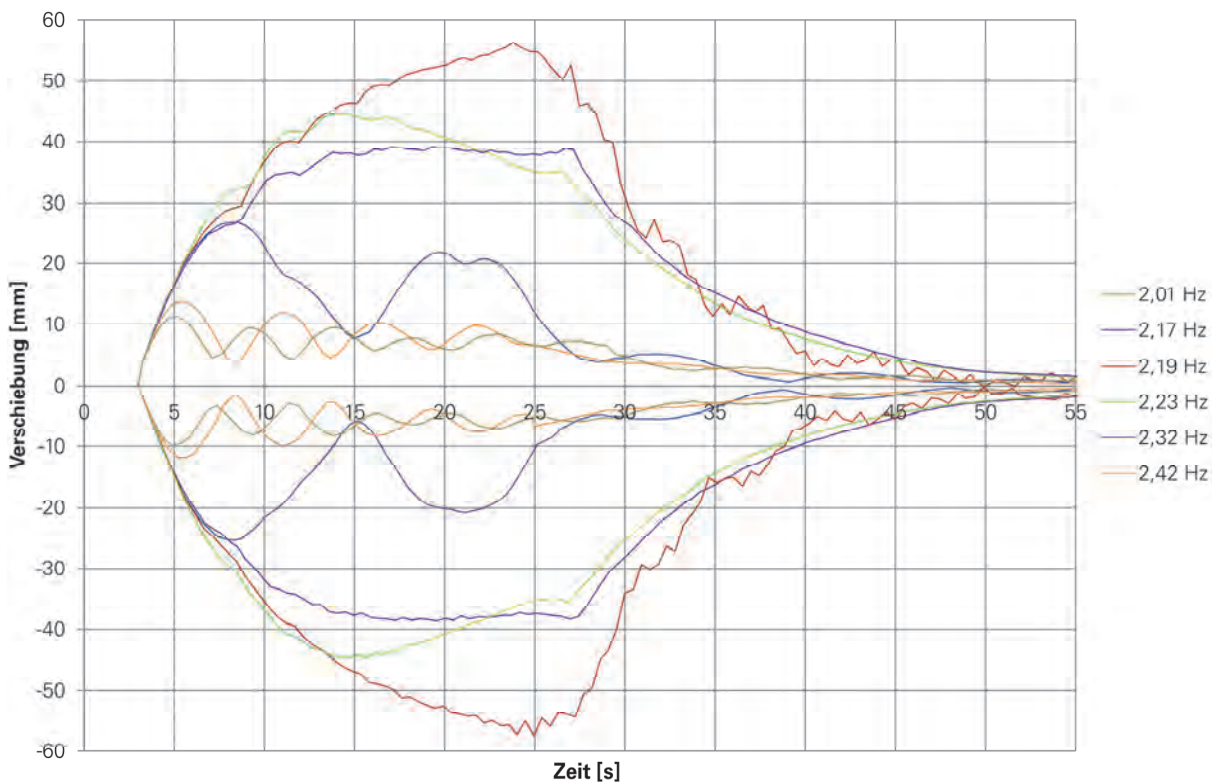


Bild 10: Zeitverlauf der Verschiebung in z-Richtung für verschiedene Erregerfrequenzen; Überbau im Schwingungsbauch [7]

Fig. 10: Time history of the displacement in z direction of different excitation frequencies; girder in antinode [7]

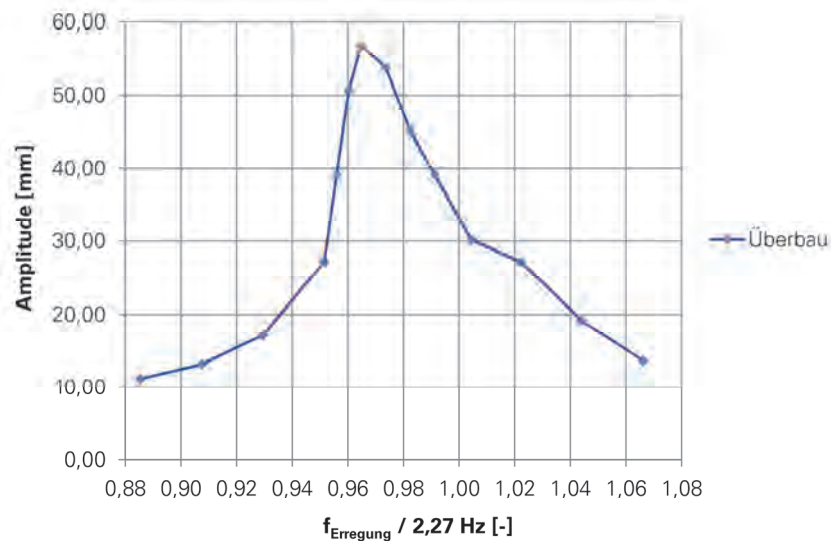


Bild 11: Amplitude in Abhängigkeit der Erregerfrequenz, Überbau

Fig. 11: Amplitude in relation to excitation frequency, girder

Man erkennt in Bild 11, dass die größten Amplituden nicht bei Anregung in der ersten Eigenfrequenz des Überbaus (bei 2,27 Hz), sondern bei 2,19 Hz auftreten. Die für kleine Schwingweiten ermittelte Eigenfrequenz von 2,27 Hz verschiebt sich für größere Amplituden. Es gibt keine Resonanzstelle wie bei linearen Systemen. Die größten Amplituden treten bei Erregung genau zwischen der ersten Überbau- und der zweiten In-plane-Eigenfrequenz von Seil 20 N (2,11 Hz) auf. Generell müssen große Fußpunktverschiebungen vorhanden sein, um die Seile stark anregen zu können.

Entscheidenden Einfluss auf das Schwingungsverhalten besitzen die Verhältnisse zwischen Seil- und Überbaueigenfrequenzen (Bild 12). Liegen die Frequenzen nah zusammen, ergeben sich sowohl für den Überbau als auch für das zugehörige Seil die größten Amplituden bei Anregung in der Seileigenfrequenz. In diesem Fall ist die mit größeren Verformungen einhergehende Seilschwingung dominant. Durch die gute Übereinstimmung der Eigenfrequenzen schwingen das Seil und der Überbau fast exakt in Phase. Das Seil regt den Überbau periodisch an (und umgekehrt).

Liegen Seil- und Überbaueigenfrequenzen weit auseinander, wird der Überbau von den Seilschwingungen kaum beeinflusst. Die Systemdämpfung (Abbremsen durch die Seile aufgrund von Frequenzinterferenzen) wirkt hier weniger stark, da die Seile nicht zu großen Schwingungen angeregt werden können. Für den Überbau können nur große Amplituden entstehen, wenn die Erregerfrequenz nahezu exakt mit der Überbaueigenfrequenz übereinstimmt. Schon bei geringen Abweichungen sinken die Überbauamplituden deutlich (siehe Bild 12, linker Teil, Anregung in Seil-EF und in Zwischen-EF). Wird der Überbau bei weit auseinanderliegenden Eigenfrequenzen in der Eigenfrequenz des Seiles angeregt, können aufgrund der geringen Fußpunktverschiebungen (geringe Überbauamplituden) nur geringe Seilamplituden induziert werden.

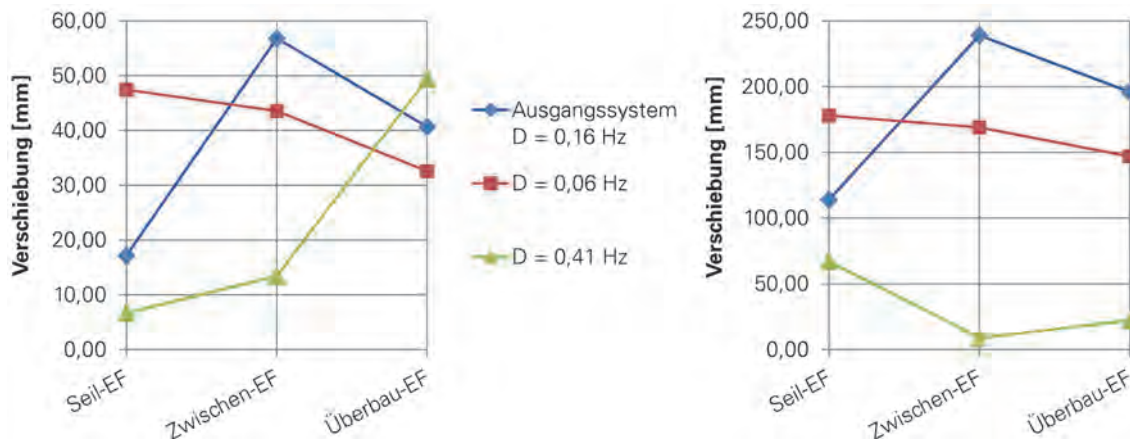


Bild 12: Verschiebungen des Überbaus (links) und des zugehörigen Seiles (rechts) in globaler z-Richtung; D = Differenz zwischen Überbau- und Seileigenfrequenz [7]

Fig. 12: Displacement of girder (left) and associated rope (right) in global z direction; D = difference between girder and rope eigenfrequency [7]

Falls die ungünstige Konstellation vorliegt, dass eine Überbaueigenfrequenz und eine oder mehrere Seileigenfrequenzen nah zusammenliegen und diese sich im Bereich einer häufigen Fußgängeranregung befinden, treten häufig große Amplituden auf. Diese Konstellation ist für den Nutzerkomfort der Brücke nachteilig.

8 Anwendung und Ausblick

Neben der Brücke über die B170 wurde die Molebrücke in Dresden-Pieschen untersucht. Diese besitzt 12 Seile, wovon zehn mit dem Überbau verbunden sind. Aufgrund der größeren Anzahl von Seilen ist die Systemdämpfung größer. Große Schwingungsamplituden können nicht induziert werden, obwohl die Brücke sehr schlank ausgeführt ist und es einige Resonanz- und Parameterresonanzbereiche zwischen Seil- und Überbaueigenfrequenzen gibt. Es gibt mehrere Eigenfrequenzen, die durch Fußgänger angeregt werden können. Aufgrund der Überlagerung dieser Frequenzen und der Interferenz zwischen den Überbau- und Seilschwingungen sind die Messsignale unregelmäßig.

Treten bei einer Schrägseilfußgängerbrücke große Schwingungsamplituden auf, die den Nutzerkomfort beeinträchtigen, ist das Nachspannen einzelner, stark schwingender Seile eine effiziente Sanierungsmöglichkeit, da somit die Frequenzverhältnisse zwischen Seilen und Überbau verändert werden können. Zudem kann eine Verstimmung zwischen den Seilen (Verbindung über dünne Zugglieder) eine kostengünstige Alternative zum Einbau eines Schwingungstilgers, der unter Umständen das Schwingungsverhalten der Brücke weniger beeinflussen kann, sein.

Um die getroffenen, allgemein gültigen Aussagen zu überprüfen, sind weitere Untersuchungen anderer Fußgängerbrücken erforderlich. Jedes Tragwerk hat dennoch eigene Spezifika, wodurch vergleichende, allgemeine Formulierungen nur begrenzt möglich sind.

Literatur

- [1] KOVÁCS, I.: Zur Frage der Seilschwingungen und der Seildämpfung. *Bautechnik* 59 (1982) 10, S. 325–332.
- [2] PETERSEN, C.: *Dynamik der Baukonstruktionen*. Vieweg Verlag, 2000.
- [3] THALHEIM, J.-U.: *Nichtlineare Seilschwingungen und Stabilitätsanalysen für Seilbewegungen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2003.
- [4] BACHMANN, H.; AMMAN, W.: *Schwingungsprobleme bei Bauwerken*. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IVBH), 1987.
- [5] BUTZ, C.; DISTL, J.: Personen-induzierte Schwingungen von Fußgängerbrücken. In: KUHLMANN, U. (Hrsg.): *Stahlbau-Kalender 2008*, Berlin : Ernst & Sohn, 2008, S. 695–768 – ISBN: 978-3-433-01872-9.
- [6] ZIVANOVIC, S; PAVIC, A.; REYNOLDS, P.: Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of Sound and Vibration* 279 (2005) 1 und 2, S. 1–74.
- [7] MAULHARDT, C.: *Numerische Modellierung fußgängerinduzierter Schwingungen von Fußgängerbrücken mit nichtlinearen Systemeigenschaften*. Diplomarbeit, Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden, 2012.