



Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Brückenbauwerken mittels Laserinterferometer¹

Willfried Schwarz

1. Einführung

Brückenbauwerke, wie z.B. Straßen-, Eisenbahn- und Fußgängerbrücken, werden während ihrer Beanspruchung besonders in vertikaler Richtung verformt bzw. durch den fließenden Verkehr zu Schwingungen angeregt. Durch Messung der Schwingungen an Brückenbauwerken kann deren Eigenschwingverhalten (Kurzzeitmessung) sowie deren Dauerbeanspruchung (Langzeitmessung) durch den fließenden Verkehr und/oder durch Wind ermittelt werden. Schwingungsmessungen dienen der Beurteilung der Ermüdungssicherheit sowie der Festlegung geeigneter Sanierungsmaßnahmen. Schwingungsmessungen werden im Grunde genommen auf die Messung von Geschwindigkeiten, Beschleunigungen oder Wegänderungen zurückgeführt [9, Seite 581ff]. Wegänderungen werden z. B. mit Dehnungsmessstreifen, mit den üblichen Wegsensoren und berührungslos mit kapazitiven, mit Wirbelstrom- bzw. mit Hall-Sensoren sowie mit optischen Verfahren gemessen. Hochgenaue Messungen lassen sich mit optischen Verfahren erzielen, wie z. B. mit der Laserinterferometrie (Laserinterferometer, Vibrometer) oder mit Verfahren, die auf Intensitätsänderungen des Lichts beruhen.

Die Schwingungssensoren haben spezifische Kenndaten, die je nach Anwendungsfall (Frequenz- und Amplitudenbereich) zu berücksichtigen sind. Dabei muss auch betrachtet werden, welches Ergebnis die Schwingungsmessung liefern soll: es können die Frequenzen der Bauwerksschwingung, die dabei auftretenden Geschwindigkeiten bzw. Beschleunigungen oder die Wegänderungen (Amplitude der Schwingung) ermittelt werden. Wenn die durch die Schwingung hervorgerufenen Wegänderungen im Vordergrund des Interesses stehen, eignen sich besonders gut Laserinterferometer. In diesem Artikel soll deshalb für die Bestimmung der Wegänderungen ein Laserinterferometer eingesetzt werden. Laserinterferometer sind bei der Bestimmung von Bauwerksschwingungen verschiedentlich eingesetzt worden z. B. von [4], [11]. In diesem Beitrag werden nach einer kurzen Darstellung des Grundprinzips laserinterferometrischer Schwingungsmessungen einige beispielhafte Anwendungen an Brückenbauwerken

vorgelegt. Danach werden in einer Genauigkeitsanalyse die wesentlichen Unterschiede der interferometrischen Methode zur Bestimmung der Wegänderungen mit Beschleunigungssensoren aufgezeigt.

2. Grundprinzip interferometrischer Schwingungsmessungen

Bei der Laserinterferometrie [10, Seite 79ff] werden zwei Lichtwellen gemeinsamen Ursprungs nach Durchlaufen unterschiedlicher Wege wieder vereinigt (im Punkt A, Abb. 1). In Abhängigkeit vom Phasenunterschied der beiden Wellen wird die Amplitude der austretenden Welle verändert. Bei einem Phasenunterschied von 0° ergibt sich eine Lichtverstärkung, während bei einem Phasenunterschied von 180° die Lichtintensität vermindert wird. Sind die Amplituden beider Wellen gleich, so löschen sich beide Wellen aus; es tritt Dunkelheit ein (Abb. 1). Wird der Reflektor verschoben, so ändert der austretende Lichtstrahl seine Intensität periodisch zwischen hell und dunkel. Eine Zählung dieser Wechsel multipliziert mit der halben Wellenlänge des Lichts ($= 0,3 \mu\text{m}$) ergibt den Verschiebebetrag des Reflektors. Bei der Interpolation der

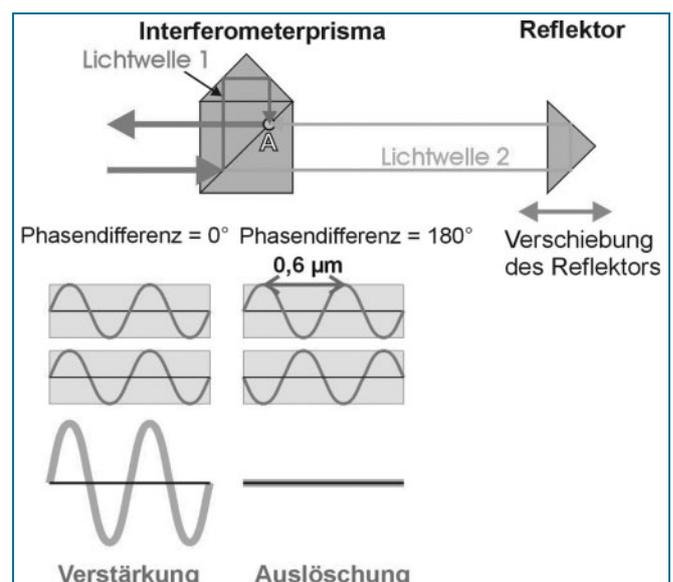


Abb. 1: Grundprinzip eines Laserinterferometers

¹ Überarbeitete Fassung des Beitrages mit gleichem Thema, veröffentlicht im Tagungsband „Baudynamik“ (VDI-Berichte 1941) der VDI-Tagung Baudynamik am 17. und 18. Mai 2006 in Kassel.

Helligkeitswerte ist es möglich, Streckenänderungen mit einer Auflösung von $0,01 \mu\text{m}$ zu erfassen. Laserinterferometer haben einen Messbereich bis zu 30 m und können in einer Sekunde einige 1000 Messungen durchführen. Sie sind somit geeignet, Schwingungen mit verhältnismäßig hohen Frequenzen zu erfassen, wobei die Größe der Amplitude keine Rolle spielt.

Laserinterferometrische Messungen werden vom Brechungsindex der Atmosphäre beeinflusst [10, Seite 83], die der Laserstrahl durchläuft. Der Brechungsindex hängt ab von der Lufttemperatur, dem Luftdruck und dem Partialdruck des Wasserdampfs. Der Brechungsindex ändert sich bei mittleren Verhältnissen um $1 \cdot 10^{-6}$, also $1 \text{ ppm} = 1 \mu\text{m/m}$, wenn die Lufttemperatur um 1,0 K oder der Luftdruck um 3,4 hPa oder der Partialdruck des Wasserdampfes um 17 hPa variiert. Die kritischste Größe für die Bestimmung des Brechungsindexes ist die Lufttemperatur. Um z. B. bei einer Entfernung von 10 m eine Standardabweichung von $1 \mu\text{m}$ zu erreichen, sollte die Lufttemperatur repräsentativ auf 0,1 K erfasst werden, eine Forderung, die aufgrund der jeweilig herrschenden Umweltbedingungen am Messort nicht immer erreicht werden kann.

Die gesamte Messeinrichtung besteht aus dem Messkopf des Laserinterferometers, dem Interferometerprisma, dem Reflektor, einem Rechner mit eingesetzter Messwerterfassungskarte für das Interferometer und aus einer unabhängigen Stromversorgungseinheit (Abb. 2). Wie eingangs erwähnt, sollen vertikale Verformungsänderungen der Brücken gemessen werden. Deshalb ist das Interferometerprisma, das zusammen mit dem Messkopf des Interferometers auf einem Stativ montiert ist, so ausgerichtet, dass der Laserstrahl senkrecht nach oben gelenkt wird; er trifft am Messpunkt auf den Reflektor, der am Brückenbauwerk befestigt ist. Mit einem Vibrometer können die Messungen reflektorlos zur Oberfläche des Bauwerks ausgeführt werden.

Durch den verhältnismäßig großen Messbereich von Laserinterferometern von bis zu 30 m ist es möglich, das Interferometer entsprechend weit vom Messpunkt (z. B. unter der Brücke) zu platzieren, so dass die Stabilität des Aufbaus nicht vom Verhalten des Bauwerks beeinträchtigt wird. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass Veränderungen der meteorologischen Verhältnisse in dem gesamten Bereich zwischen Interferometerprisma und Reflektor Auswirkungen auf die Messwerte haben [10, Seite 88]. Letztlich wird die Genauigkeit der gemessenen Wegänderungen hauptsächlich durch diesen Einflussfaktor bestimmt. Würden andere Wegsensoren mit Messbereichen von wenigen Zentimetern oder Millimetern eingesetzt, wäre der Aufbau einer entsprechend stabilen Messbasis unterhalb des Brückenbauwerks erforderlich. Im Gegensatz dazu benötigen Beschleunigungssensoren, aus deren Messwerten Wegänderungen berechenbar sind (vgl. Abschnitt 4), keine Messbasis. Es wird davon ausgegangen, dass die Raumposition der seismischen Masse der Beschleunigungssensoren von den Bewegungen des Brückenbauwerks nicht beeinträchtigt wird. Je kleiner die Frequenzen der Wegänderungen sind, desto wahrscheinlicher ist es jedoch, dass diese Annahme nicht zutrifft und sich systematische Messabweichungen einstellen. Erste Untersuchungen zu dieser Fragestellung

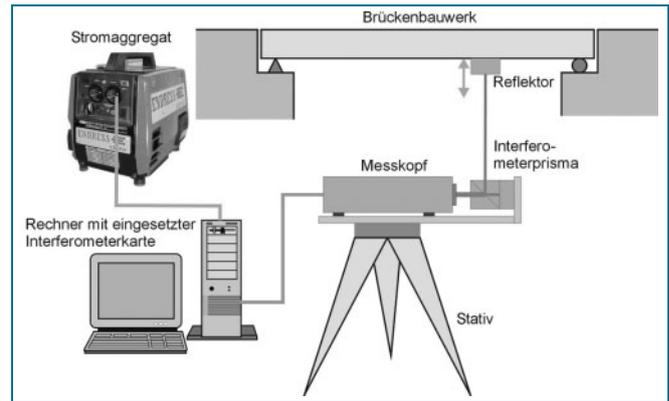


Abb. 2: Messaufbau (schematisch)

sind in [7] veröffentlicht. Bei den praktischen Messungen mit dem Laserinterferometer werden die Messwerte mit einer Messfrequenz von 200 Hz aufgezeichnet, was einem Abtastintervall von 5 ms entspricht.

3. Projekte und Ergebnisse

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden mit dem Laserinterferometer an einer Reihe von unterschiedlichsten Brückenbauwerken Schwingungs- bzw. Verformungsmessungen vorgenommen [2]. Aus der Vielzahl gemessener Brückenbauwerke sollen hier jeweils nur ein Vertreter einer Fußgänger-, einer Eisenbahn- und einer Autobahnbrücke vorgestellt werden.

Bei der Fußgängerbrücke mit einer Spannweite von 22 m (Abb. 3) als Stahl-Beton-Konstruktion, die über einen Bach verläuft, konnte das Interferometer nur 1,6 m vom Widerlager entfernt aufgestellt werden (Abb. 4).

Unter der Beanspruchung durch Fußgänger beginnt die Brücke zu schwingen. Aus dem Weg-Zeit-Diagramm (Abb. 5) ist zu erkennen, dass am Messpunkt die Amplitude der Schwingung bis zu 7,5 mm ansteigt und dann wieder abklingt. Die Amplitude in der Mitte der Brücke ist weitaus größer (über 50 mm).



Abb. 3: Fußgängerbrücke



Abb. 4: Messaufbau bei der Fußgängerbrücke



Abb. 8: Eisenbahnbrücke

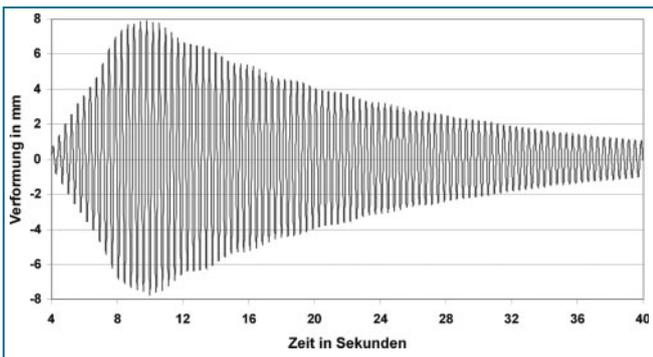


Abb. 5: Weg-Zeit-Diagramm

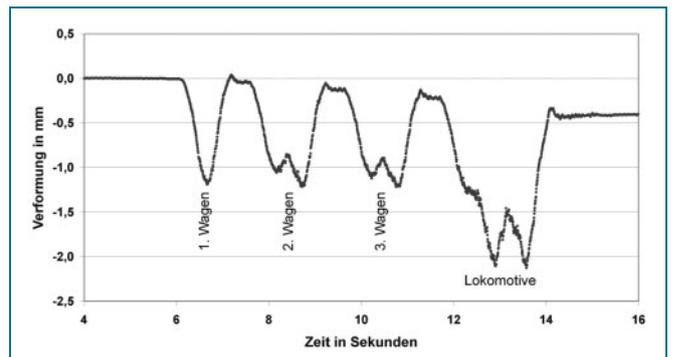


Abb. 9: Weg-Zeit-Diagramm

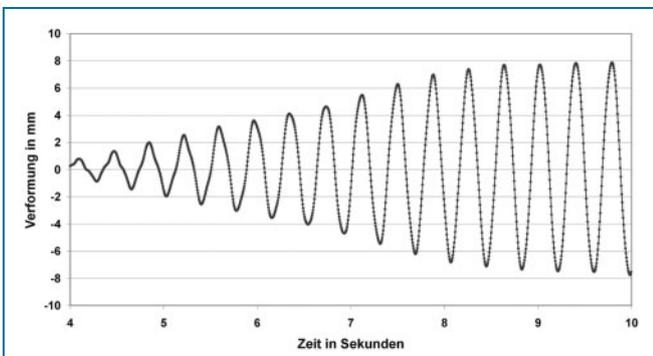


Abb. 6: Ausschnittvergrößerung aus Abb. 5

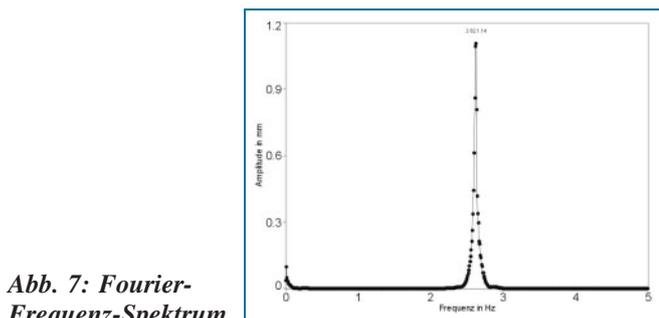


Abb. 7: Fourier-Frequenz-Spektrum

In der Ausschnittvergrößerung (Abb. 6) ist die hohe Präzision der interferometrischen Messungen zu erkennen; die einzelnen Messwerte zeichnen die Schwingung exakt nach. Das Fourier-Frequenz-Spektrum (Abb. 7), das mit einer Demo-Version des Programms AutoSign V1.7 der Firma Systat berechnet worden ist, zeigt eine Frequenz von 2,6 Hz (Eigenfrequenz der Brücke). Die Amplitude wird mit 1,1 mm angegeben; dieser Wert ist als Mittelwert der Amplituden über den gesamten Messzeitraum anzusehen und ist deshalb so klein.

Bei der Eisenbahnbrücke handelt es sich um eine Stahlbrücke mit einer Spannweite von 9,0 m (Abb. 8). Bei der Überfahrt eines Zuges mit 3 Personenwagen und einer Lokomotive ergeben sich vertikale Verformungen von bis zu 2,0 mm. Deutlich sind im Weg-Zeit-Diagramm (Abb. 9) die einzelnen Achsen der Wagen bzw. die der Lokomotive zu erkennen. Nach der Überfahrt kehrt die Brücke nicht direkt wieder in ihre Ausgangslage zurück; es verbleibt eine Abweichung von 0,4 mm, die wohl erst allmählich wieder abgebaut wird. Das Fourier-Frequenz-Spektrum wurde hier nicht bestimmt, da die Überfahrt eines Zuges die Brücke nicht zu Schwingungen anregt; es stellen sich vielmehr lastbedingte Verformungen ein.

Die Autobahnbrücke ist eine Spannbetonbrücke mit einer Gesamtlänge von 375 m und hat eine Höhe über der Talsohle von bis zu 30 m. Sie wurde parallel zu einer bereits



Abb. 10: Autobahnbrücke

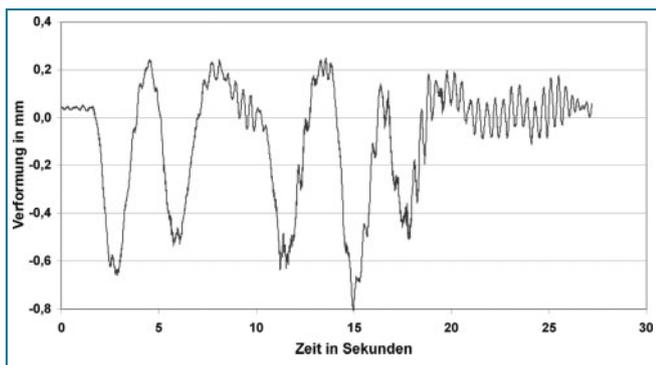


Abb. 11: Weg-Zeit-Diagramm

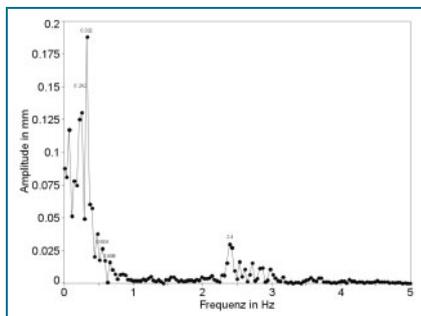


Abb. 12: Fourier-Frequenz-Spektrum

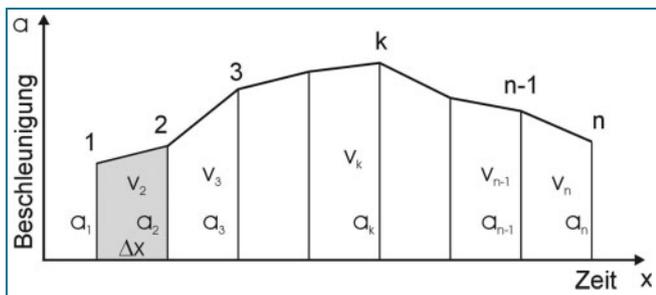


Abb. 13: In regelmäßigen Zeitintervallen gemessene Beschleunigungswerte

vorhandenen Bogenbrücke errichtet (Abb. 10). Die Brücke besteht aus 6 Feldern – mit einer jeweiligen Länge von ca. 50 m – und fünf Paaren Betonpfeilern. Dieses Brückenwerk ist aufgrund der hohen Verkehrsbelastung und der großen Spannweite besonders für Schwingungsuntersuchungen geeignet. Aufgrund der Örtlichkeiten konnten die Messungen nur in einem Abstand von 10,5 m vom Widerlager der Brücke entfernt durchgeführt werden. Das Weg-Zeit-Diagramm (Abb. 11) zeigt das Verhalten der Brücke bei der Überfahrt von fünf Lastkraftwagen und zehn Personenwagen. Deutlich sind die durch die Lastwagen hervorgerufenen Verformungen von bis zu 0,8 mm zu erkennen. Nachdem die Lastwagen jeweils das benachbarte Brückenfeld erreicht haben, erfährt das gerade befahrene Brückenfeld eine positive Höhenänderung (nach oben) in der Größenordnung von 0,2 mm. In den Zeiten dazwischen schwingt die Brücke mit einer Amplitude von ca. 0,1 mm.

Das Fourier-Frequenz-Spektrum zeigt (Abb. 12), abgesehen von den Schwingungen <1 Hz, die durch die Taktfolge der Lastwagen hervorgerufen werden und lediglich Verformungen und keine Schwingungen anzeigen, bei 2,4 Hz eine Schwingung, deren Amplitude gerade als signifikant bezeichnet werden kann (Eigenfrequenz der Brücke).

4. Genauigkeitsvergleich zur Schwingungsmessung mit Beschleunigungssensoren

Bei Schwingungsmessungen mit Laserinterferometern werden im Messpunkt direkt die Wegänderungen gemessen. Die Genauigkeit wird dabei primär von den Änderungen der Lufttemperatur im Bereich zwischen dem Interferometerprisma und dem Reflektor bestimmt. Nicht erfassbare Temperaturänderungen von z.B. 1 K führen bei einem Abstand von 10 m zu Messwertänderungen von 10 μm. Die Messzeit bei Schwingungsmessungen ist zumeist sehr kurz, in der Regel <1 Minute, so dass größere Temperaturänderungen in dieser Zeit unwahrscheinlich sind. Die Genauigkeit der Wegänderungen ist unabhängig von der Messzeit im Gegensatz zu Messungen mit Beschleunigungssensoren. Die gemessenen Beschleunigungswerte sind zweifach über die Zeit zu integrieren, um zu Wegänderungen zu gelangen. In diesem Abschnitt soll anhand einer Genauigkeitsanalyse aufgezeigt werden, mit welchen Standardabweichungen Wegänderungen mit Beschleunigungssensoren bestimmt werden können.

Im diskreten Fall, in dem Beschleunigungswerte a_i ($i = 1 \dots n$) nur in regelmäßigen Zeitintervallen Δx registriert worden sind (Abb. 13), wird üblicherweise die Integration durch eine Summation ersetzt. In einem ersten Schritt werden die Geschwindigkeiten v_k an den Stellen k ($k = 2 \dots n$) berechnet

$$v_k = \left\{ \frac{a_1 + a_k}{2} + \sum_{i=2}^{k-1} a_i \right\} \cdot \Delta x \quad (1)$$

Mit v_k = Geschwindigkeit an der Stelle k
 a_1, a_k, a_i = gemessene Beschleunigungswerte
 Δx = Zeitintervall zwischen benachbarten Messungen

In einem zweiten Schritt werden durch abermalige Summation jetzt die gesuchten Wegänderungen y_m an den Stellen m ($m = 3 \dots n$) aus den zuvor berechneten Geschwindigkeitswerten bestimmt

$$y_m = \left\{ \frac{v_2 + v_m}{2} + \sum_{j=3}^{m-1} v_j \right\} \cdot \Delta x \quad (2)$$

Mit y_m = Wegänderung an der Stelle m

v_2, v_m, v_j = nach Formel (1) berechnete Geschwindigkeitswerte

Δx = Zeitintervall zwischen benachbarten Messungen

Bei dieser Methode werden die beiden Schritte nacheinander durchgeführt. Mit dem nun folgenden Ansatz können die Wegänderungen direkt berechnet werden. Für die formelmäßige Ableitung geht man vom gegebenen Weg-Zeit-Diagramm $y = f(x)$ (Abb. 14) aus.

Die erste Ableitung der Funktion $y = f(x)$ ergibt an der Stelle $(x_i + \frac{\Delta x}{2})$

$$y' \left(x_i + \frac{\Delta x}{2} \right) = v \left(x_i + \frac{\Delta x}{2} \right) = \frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \quad (3)$$

und an der Stelle $(x_i - \frac{\Delta x}{2})$

$$y' \left(x_i - \frac{\Delta x}{2} \right) = v \left(x_i - \frac{\Delta x}{2} \right) = \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta x} \quad (4)$$

Aus diesen beiden ersten Ableitungen kann jetzt die zweite Ableitung an der Stelle x_i – in unserem Fall die Beschleunigung $y''(x_i) = a_i$ – berechnet werden

$$y''(x_i) = y_i'' = a_i = \frac{y'(x_i + \frac{\Delta x}{2}) - y'(x_i - \frac{\Delta x}{2})}{\Delta x} \quad (5)$$

und mit den beiden Formeln (3) und (4) folgt

$$y''(x_i) = y_i'' = a_i = \frac{y_{i+1} - 2 \cdot y_i + y_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (6)$$

Man erhält

$$y_{i+1} = \Delta x^2 \cdot a_i - y_{i-1} + 2 \cdot y_i \quad (7)$$

Mit dieser Rekursionsformel lässt sich aus den beiden Vorgängerwerten y_{i-1} und y_i die folgende Wegänderung y_{i+1} berechnen. Die ersten Werte für $i = 1$, also y_0 und y_1 , sind dabei zunächst willkürlich zu wählen. Für die weiteren Betrachtungen wird für $y_1 = y_0 + dy$ gesetzt. Die

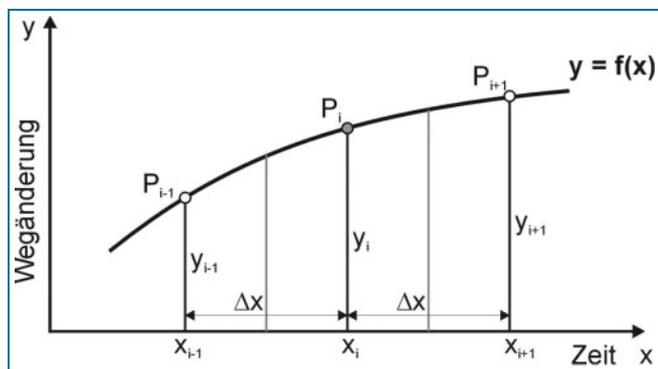


Abb. 14: Weg-Zeit-Diagramm

Rekursionsformel (7) lässt sich dann umschreiben in die folgende Summenformel

$$y_m = \Delta x^2 \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{m-1} (m-i) \cdot a_i \right\} + y_0 + m \cdot dy \quad (8)$$

In dieser Gleichung ist y_0 als Konstante enthalten, während der letzte Summand linear mit m wächst. Berechnet man also zuerst vorläufige Werte y_m mit $y_0 = 0$ und $dy = 0$, so können dann über eine lineare Regression der vorläufigen Werte y_m die Werte y_0 und dy bzw. y_1 bestimmt werden, um in einer Nachberechnung damit die endgültigen Wegänderungen y_m zu ermitteln. Diese Vorgehensweise setzt aber voraus, dass über den Messzeitraum betrachtet der Erwartungswert der Wegänderungen Null ist; eine Annahme, die in der Regel als zutreffend angesehen werden kann. Das eingangs besprochene 2-Schritt-Verfahren und diese Methode ergeben identische Ergebnisse, wie Vergleichsrechnungen gezeigt haben.

Ziel der Genauigkeitsanalyse ist es, unter Beachtung der Standardabweichung, mit der die Beschleunigungsmessungen ausgeführt werden, die Standardabweichung der Wegänderungen in Abhängigkeit von der Messzeit bezogen auf den Startzeitpunkt der Messungen zu berechnen. Die Genauigkeitsanalyse, bei der nur zufällige Messabweichungen betrachtet werden, wird nach dem Varianzfortpflanzungs-Gesetz [8, Seite 53ff] vorgenommen.

Werden die beiden Größen y_0 und y_1 bzw. dy als fehlerfrei angesehen, so ergibt sich nach Gleichung (8) zunächst das totale Differenzial zu

$$d_{y_m} = \Delta x^2 \cdot \sum_{i=1}^{m-1} (m-i) \cdot d_{a_i} \quad (9)$$

und nachdem die Differenziale d_{a_i} durch die Standardabweichungen s_{a_i} ersetzt und die Summanden einzeln quadriert worden sind, folgt

$$s_{y_m}^2 = \Delta x^4 \cdot \sum_{i=1}^{m-1} (m-i)^2 \cdot s_{a_i}^2 \quad (10)$$

Werden alle Standardabweichungen s_{a_i} gleichgesetzt und mit s_a bezeichnet, ergibt sich unter Benutzung der Reihe [1, Seite 166]

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2 + \dots + m^2 = \frac{m(m+1)(2m+1)}{6} \quad (11)$$

$$s_{y_m} = \Delta x^2 \sqrt{\frac{m(m+1)(2m+1)}{6}} \cdot s_a \quad (12)$$

Mit $m = t \cdot f$ und $\Delta x = \frac{1}{f}$ folgt schließlich

$$s_{y_m} = \sqrt{\frac{t^3}{3f} + \frac{t^2}{2f^2} + \frac{t}{6f^3}} \cdot s_a \quad (13)$$

Die beiden letzten Summanden unter der Wurzel sind in der Regel vernachlässigbar, so dass sich als Näherungsformel ergibt

$$s_{y_m} \approx \sqrt{\frac{t^3}{3f}} \cdot s_a \quad (14)$$

Die Standardabweichung der Wegänderung s_{y_m} hängt also neben der Standardabweichung der Beschleunigungsmessungen s_a , von der Messzeit t und von der Messfrequenz f ab. Eine Erhöhung der Messfrequenz führt zu einer Steigerung der Genauigkeit; wird hingegen die Messzeit verlängert, wird die Genauigkeit überproportional reduziert. In Abb. 15 sind die Standardabweichungen für mit Beschleunigungssensoren bestimmte Wegänderungen in Abhängigkeit von der Messzeit dargestellt und zwar einmal für eine als realistisch angenommene Standardabweichung² der Beschleunigungsmesswerte von $0,05 \text{ m/s}^2$ und zum anderen für eine Auflösung von $0,000\,013 \text{ m/s}^2 = 1,3 \mu\text{g}$ (z. B. Sensor 8330A3 der Firma Kistler [3]). Für die Umrechnung kann näherungsweise gesetzt werden $1 \text{ g} = 10 \text{ m/s}^2$.

Schon nach wenigen Sekunden Messzeit sind die Standardabweichungen der Wegänderungen für $s_a = 0,05 \text{ m/s}^2$ größer als 10 mm (Abb. 15: linke Skalierung), also weit oberhalb dessen, was wünschenswert wäre. Nur wenn es gelingt, die Beschleunigungsmessungen mit einer Standardabweichung im Bereich der Sensorauflösung zu messen, könnten Wegänderungen z. B. über 2 Minuten Messzeit mit einer Standardabweichung von wenigen 0,1 mm (Abb. 15: rechte Skalierung) bestimmt werden. Genauigkeiten, die beim interferometrischen Verfahren problemlos erreicht werden können, sind mit Beschleunigungssensoren nicht möglich. In [7] werden erste Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung der Messgenauigkeit von mit Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren ermittelten Wegänderungen vorgestellt.

5. Zusammenfassung, Ausblick

Nachdem das interferometrische Verfahren zur Bestimmung des Schwingungsverhaltens von Bauwerken kurz erläutert worden ist, werden an jeweils einer Fußgänger-, Eisenbahn- und Autobahnbrücke durchgeführte Messungen diskutiert. Mit dem laserinterferometrischen Verfahren können über einen Messzeitraum von einigen Minuten vertikale Wegänderungen der Bauwerke mit einer Standardabweichung von $<10 \mu\text{m}$ bei einer ausreichend hohen zeitlichen Auflösung ($5 \text{ ms} = 200 \text{ Hz}$) erfasst werden. Nach dem Varianz-Fortpflanzungsgesetz wird berechnet, mit welchen Standardabweichungen Wegänderungen bestimmt werden können, wenn für die Messungen Beschleunigungssensoren eingesetzt werden. Es ist mit Beschleunigungssensoren nicht möglich, die Wegänderungen mit vergleichbaren Genauigkeiten zu bestimmen.

² Diese Standardabweichung gibt an, mit welcher Genauigkeit der Beschleunigungswert (absolut) bestimmt werden kann. Relative Änderungen der Beschleunigungswerte sind mit wesentlich höherer Genauigkeit messbar, u. U. sogar bis zur Auflösungsgenauigkeit.

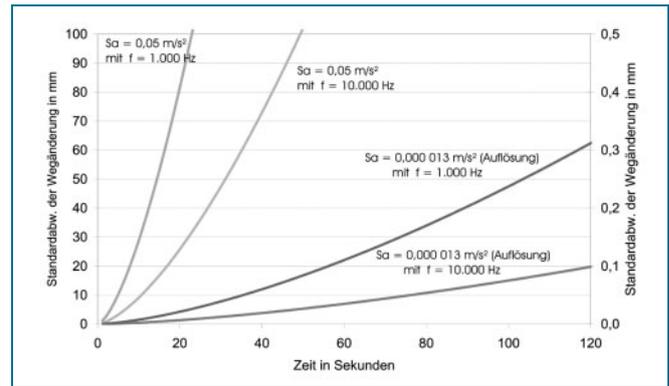


Abb. 15: Standardabweichungen der mit Beschleunigungssensoren bestimmten Wegänderungen mit $s_a = 0,05 \text{ m/s}^2$ (linke Skalierung) und $s_a = 0,000\,013 \text{ m/s}^2$ (rechte Skalierung: Auflösung)

6. Literatur

- [1] BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAJEW, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main 1981.
- [2] ENGELHAUPT, M.: Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Brückenbauwerken unterschiedlicher Bauart mittels Laserinterferometer, Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH) in Zusammenarbeit mit der Bauhaus-Universität Weimar, Dresden 2005.
- [3] Datenblatt des kraftkompensierten kapazitiven Beschleunigungssensors vom Typ 8330A3 der Firma Kistler. <http://www.kistler.com>
- [4] KÖCHLE, R.: Schwingungsmessungen an Hochhäusern mit dem Laser-Interferometer. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 57(1976), Seite 67–74.
- [5] MARCHESINI, C.: Geodätische Messung vertikaler Bewegungen von Eisenbahnbrücken während der Überfahrt von Zügen. In: Schnädelbach, K.; Schilcher, M. (Hrg.): Ingenieurvermessung 2000–XIII. International Course on Engineering Surveying, München, 13.–17. März 2000; Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 2000, Seite 372–377.
- [6] MAURER, W. u. a.: Messung periodischer Bewegungen mit dem Laser-Interferometer. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN) 94(1987)8-9, Seite 309–316.
- [7] NEITZEL, F. u. a.: Zur Genauigkeit von Schwingwegmessungen mit Hilfe von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren. In: Brunner, F. (Hrg.): Ingenieurvermessung 2007–15. Internationaler Ingenieurvermessungskurs, Graz, 17.–20. April 2007 (im Druck).
- [8] NIEMEIER, W.: Ausgleichsrechnung. Verlag de Gruyter, Berlin 2002.
- [9] PROFOS, P.; PFEIFER, T. (Hrsg.): Handbuch der industriellen Meßtechnik. 5. Auflage; Oldenbourg Verlag; München, Wien 1992.
- [10] SCHWARZ, W. (Hrsg.): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1995.
- [11] SECKL, B.: Schwingungsmessungen an einem Kirchturm mit einem Laser-Interferometer. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 90(1983), Seite 70–76.
- [12] WOLF, H.: Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn 1968.

Anschrift des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. WILLFRIED SCHWARZ
Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät für Bauingenieurwesen
Professur Geodäsie und Photogrammetrie
Marienstraße 9
99423 Weimar

Kurzfassung

Für die Bestimmung des Schwingungsverhaltens von Brückenbauwerken eignen sich Laserinterferometer dann besonders gut, wenn die durch die Schwingung hervorgerufenen Wegänderungen des Bauwerks im Vordergrund des Interesses stehen. Aufgrund des großen Messbereichs bis zu 30 m benötigen Laserinterferometer keine besondere Messbasis; sie können außerhalb des Einwirkungsbereichs des Bauwerks aufgestellt werden. In diesem Beitrag wird das Grundprinzip interferometrischer Schwingungsmessungen kurz erläutert. Es werden Messungsergebnisse jeweils an einer Fußgänger-, einer Eisenbahn- und einer Autobahnbrücke diskutiert. Mit einem Laserinterferometer können auch über einen längeren Zeitraum von mehreren Minuten die Wegänderungen mit einer Standardabweichung von $< 10 \mu\text{m}$ und einer hohen zeitlichen Auflösung von 5 ms bestimmt werden. Die Messfrequenz ließe sich im Bedarfsfall noch wesentlich erhöhen. Weiterhin wird untersucht, mit welchen Genauigkeiten die Wegänderungen ermittelt werden könnten, wenn Beschleunigungssensoren eingesetzt werden.

Abstract

To determine the vibration behaviour of bridge constructions laser interferometers are qualified exceptionally, if changes of the height of the construction come to the fore. On the basis of the large measurement range up to 30 m laser interferometer do not use a special reference basis for the measurements. It is possible to put up the laser interferometer outside of the area influenced by the construction. In this article the basic principle of vibration measurements using laser interferometer will be described. The results of vibration measurements carried out for a footbridge, a railway bridge and a motorway bridge are discussed. Using a laser interferometer it is possible to measure the changes of the height over a longer period of several minutes with a standard deviation better than $10 \mu\text{m}$ carrying out 200 measurements per second. At last the precision of changes of the heights using accelerator sensors will be discussed.