

Zur Genauigkeit von Schwingwegmessungen mit Hilfe von Beschleunigungs- und Geschwindigkeitssensoren

Frank NEITZEL, Thomas SCHWANEBECK und Willfried SCHWARZ

Zusammenfassung

Bei der Erfassung von Bauwerksschwingungen als Bestandteil eines umfassenden Bauwerksmonitorings können die Wegänderungen prinzipiell aus den Messsignalen handelsüblicher Schwingungssensoren (Geschwindigkeits- oder Beschleunigungssensoren) mittels Integration berechnet werden. Diese Verfahrensweise hat den Vorteil einer messbasisfreien Ermittlung von Wegänderungen. Allerdings ist nicht hinreichend bekannt, mit welcher Genauigkeit sich dabei die Wegänderungen besonders für den niederfrequenten Bereich < 10 Hz berechnen lassen. Im Rahmen dieses Beitrages werden die wesentlichen genauigkeitsrelevanten Einflussparameter auf die Berechnung von Wegänderungen aus den Messwerten von Schwingungsaufnehmern vorgestellt. Im experimentellen Teil werden dann erste Ergebnisse der Untersuchungen von unterschiedlichen Schwingungssensoren diskutiert. Als Referenzsystem wird dabei ein Laserinterferometer eingesetzt, das quasi fehlerfreie Wegmesswerte mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung liefert.

1 Einleitung

Um das Gesamtsystem eines Bauwerks zu erfassen, kommen neben geodätischen Überwachungsmessungen vielfach dynamische Analysen zum Einsatz. Dabei wird das Schwingungsverhalten bei erzwungener Anregung oder bei ambienter Anregung (Anregung durch Schwingungen in der Natur) mit Hilfe von Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitssensoren erfasst. Zur Beurteilung des Bauwerks werden die Zeitreihen der Messdaten in den Frequenzbereich transformiert, um die Eigenfrequenzen zu identifizieren. Ein wesentliches Beurteilungshilfsmittel stellen so genannte Trendkarten dar, in denen die Frequenzspektren mehrerer Untersuchungen gemeinsam dargestellt und interpretiert werden. Eine Schädigung des Bauwerks zeigt sich frühzeitig in einer Änderung der modalen Parameter und kann erkannt werden, bevor geometrische Veränderungen auf Bauwerksschäden hinweisen.

Die zweite wesentliche Größe zur Beurteilung eines Bauwerks sind die Eigenformen. Eigenformen sind die zu den Eigenfrequenzen korrespondierenden Bewegungen des Bauwerks. Die Berechnung dieser Schwingwege erfolgt, je nach eingesetztem Sensor, durch einfache Integration von Geschwindigkeits- oder zweifache Integration von Beschleunigungsmessungen. Ein Überwachungskonzept für Talsperren unter Verwendung von Beschleunigungsmessungen ambienter Schwingungen wird in (GEIER & LUTZ 2002) vorgestellt. Da nicht hinreichend bekannt ist, mit welcher Genauigkeit sich die Schwingwege berechnen lassen, werden im Folgenden zunächst die genauigkeitsrelevanten Einflussparameter aufgeführt. Nach der Vorstellung der Geräte und des Versuchsaufbaus werden erste Ergebnisse zur Beurteilung der Genauigkeit berechneter Wegwerte präsentiert.

2 Genauigkeitsrelevante Einflussparameter

Als Messwerte liegen je nach verwendetem Sensor Zeitreihen der Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsmessungen vor. Nach einer Überprüfung der Messwerte auf das Vorhandensein grober Fehler, die z. B. durch eine Plausibilitätsprüfung der graphischen Darstellung der Zeitreihen erfolgen kann, können die gesuchten Wegwerte durch einfache bzw. zweifache Integration berechnet werden.

Die Frage nach der Fortpflanzung zufälliger Messabweichungen kann a priori nicht beantwortet werden, da Standardabweichungen, die die Genauigkeit von Beschleunigungs- bzw. Geschwindigkeitsmessungen (absolut) beschreiben, in den Datenblättern der Sensoren nicht angegeben werden. Die Standardabweichung berechneter Wegwerte kann also nur durch Vergleichsmessungen mit einem Weggeber hoher Genauigkeit (z. B. Laserinterferometer) bestimmt werden.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die berechneten Wegwerte hauptsächlich durch systematische Messabweichungen verfälscht werden. Beispiele für systematische Messabweichungen sind:

- Einlaufeffekte des Sensors,
- Nullpunktverschiebung (Offset),
- thermisches Driften der Nullpunktverschiebung,
- thermisches oder frequenzabhängiges Driften des Übertragungsfaktors.

Für den Beschleunigungssensor vom Typ 8330A2.5 der Firma Kistler, siehe Tabelle 1, konnten zwei Untersuchungen durchgeführt werden und zwar zum Einlaufverhalten sowie zum thermischen Driften der Nullpunktverschiebung. In beiden Versuchen wurde der Sensor auf einer horizontalen Granitplatte fest aufgebaut; die Digitalwandlung erfolgte mit einem Digitalmultimeter im Messbereich von 1 Volt und einer Auflösung von 21 bits (= 0,5 μV). Zur Vermeidung von Auswirkungen der Einlaufeffekte auf die Messungen, wurde das Multimeter mehrere Stunden vor Versuchsbeginn eingeschaltet.

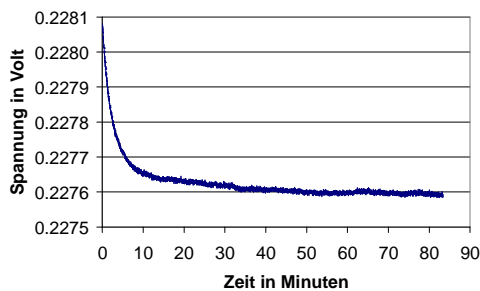


Abb. 1: Einlaufverhalten

Das Einlaufverhalten wurde über einen Zeitraum von über 80 Minuten bestimmt. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse. In den ersten 10 Minuten der Betriebszeit des Sensors verändert sich sein Ausgangssignal verhältnismäßig stark um 0,4 mV. Danach zeigt das Ausgangssignal quasi lineares Verhalten mit einer zeitlichen Änderung von 0,82 $\mu\text{V}/\text{Minute}$.

Bei der Bestimmung der thermischen Nullpunktverschiebung wurde über den auf der Granitplatte fest montierten Sensor eine Styroporbox gestülpt. Eine in die Deckfläche der Box eingearbeitete Metallplatte konnte über Pelierelemente aufgeheizt werden, wodurch über die Luft in der Box auch der Sensor erwärmt wurde. Ein auf der Seitenfläche des Schwingsensors befestigter Temperatursensor (Pt100-Fühler) bestimmte die Sensortemperatur.

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Zeit graphisch dargestellt. Das Spannungssignal des Sensors ändert sich direkt mit der Temperatur. In der Erwärmungsphase wird es um 4 mV kleiner, um nach der Abkühlung im Prinzip wieder auf den ursprünglichen Ausgangswert zurückzukehren. Werden die Spannungswerte des Sensors in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt, siehe Abbildung 3, dann ist ein lineares Verhalten zu erkennen. Die thermische Nullpunktverschiebung beträgt $-211 \mu\text{g/K}$. Laut Herstellerangabe, siehe Tabelle 1, sollte allerdings ein Betrag von $200 \mu\text{g/K}$ nicht überschritten werden.

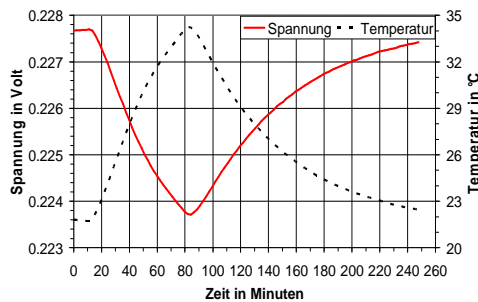


Abb. 2: Ergebnisse zur Bestimmung der thermischen Nullpunktverschiebung

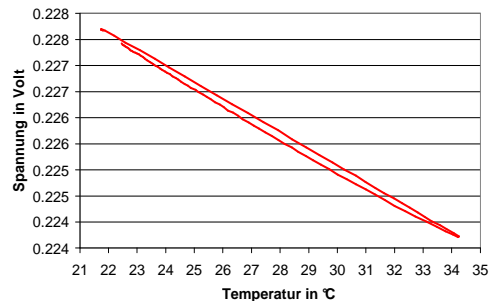


Abb. 3: Thermische Nullpunktverschiebung in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Verfälschung der Messwerte durch systematische Einflüsse ist für die vorliegende Aufgabenstellung besonders kritisch. Da die gesuchten Wegwerte durch ein- bzw. zweifache Integration berechnet werden, verstärkt sich deren Einfluss und kann zu einer erheblichen systematischen Verfälschung der Wegwerte führen. So bewirkt z. B. eine Nullpunktverschiebung der Beschleunigungswerte parabelförmige Streckenabweichungen, eine Drift der Nullpunktverschiebung verursacht Abweichungen in Form eines Polynoms 3. Grades.

3 Sensorik, Messwerterfassung und Versuchsdurchführung

Wegänderungen von Bauwerksschwingungen lassen sich aus den Messwerten unterschiedlicher Sensoren ermitteln. Zum einen können sie direkt mit Wegsensoren (z. B. induktive Wegaufnehmer, Laserinterferometer) bestimmt werden und zum anderen lassen sich die Wegänderungen aus den Messwerten von Schwinggeschwindigkeits- bzw. Schwingbeschleunigungsaufnehmern durch einfache bzw. zweifache Integration berechnen. Für die Untersuchungen wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Sensoren mit ihren hier angegebenen Kenndaten eingesetzt¹.

¹ Der Sensor vom Typ 8330A2.5 wurde von der Firma Kistler Instrumente GmbH und die anderen Sensoren wurden von der Professur Baumechanik der Bauhaus-Universität Weimar freundlicherweise für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

Auf das Funktionsprinzip der Sensoren wird an dieser Stelle nicht eingegangen; es sei auf die entsprechende Fachliteratur wie z. B. (PROFOS & PFEIFER 1992), (PETZSCHE & MÜLLER 2006) und auf die Firmenpräsentationen, siehe Literaturhinweise in Tabelle 1, verwiesen.

Tabelle 1: Kenndaten der verwendeten Sensoren

	Beschleunigungssensoren				Geschwindigkeitssensor
	ServoK-Beam Typ 8330A2.5 (KISTLER 2003)	KB12V (METRA 2003)	ACF 24 S (ZIEGLER 2006)	ICP; SEISMIC Typ 393A03 (PIEZOTRONICS 2006)	Geophone SM-6 (GEOPHONE 2006)
Hersteller	Kistler Instrumente GmbH	Metra Mess- und Frequenztechnik Radebeul e. K.	ZINS ZIEGLER-Instruments GmbH	PCB PIEZOTRONICS / USA	INPUT/OUTPUT INC.
Funktionsprinzip	kapazitiv (kraftkompensiert)	piezoelektrisch	piezoelektrisch, (triaxialer Sensor)	piezoelektrisch	Induktionsprinzip
Messbereich	±2,5 g	±2 g	±0,3 g	±5 g	keine Angabe
Frequenzbereich	0 Hz bis 300 Hz (±5 %) 0 Hz bis 2 000 Hz (±3 dB)	keine Angabe	0,2 Hz bis 300 Hz	0,2 Hz bis 6 000 Hz (3 dB)	8 Hz bis >1 000 Hz
Empfindlichkeit	1 500 mV/g	3 000 mV/g	15 000 mV/g	1 000 mV/g	28 800 mV/(m/s)
Auflösung bzw. Rauschen typ. 0 ... 10 Hz	<2,5 µg	1,4 µg bei 20 ... 50 000 Hz	<20 µV(rms)	0,1 µg/√Hz bis 2 µg/√Hz	keine Angabe
Linearitätsfehler	±0,2 % FSO	keine Angabe	keine Angabe	<1%	keine Angabe
Resonanzfrequenz	5 000 Hz	> 350 Hz	1 500 Hz	>10 000 Hz	4,5 Hz
Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit typ. (max.)	50 (100) ppm/K	-0,11%/K	keine Angabe	700 (2100) ppm/K	keine Angabe
thermische Nullpunktverschiebung, typ. (max.)	100 (200) µg/K	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
Arbeitstemperaturbereich	(-40 ... +85)°C	(-10 ... +80)°C	(-20 ... +60)°C	(-55 ... +120)°C	(-40 ... +100)°C
Abmessungen	27 mm x 23 mm x 16 mm	Ø 48 mm x 37 mm (Höhe)	Ø 150 mm x 78 mm (Höhe)	Ø 30 mm x 56 mm (Höhe)	Ø 26 mm x 36 mm (Höhe)
Masse	28 Gramm	150 Gramm	1 500 Gramm	210 Gramm	81 Gramm

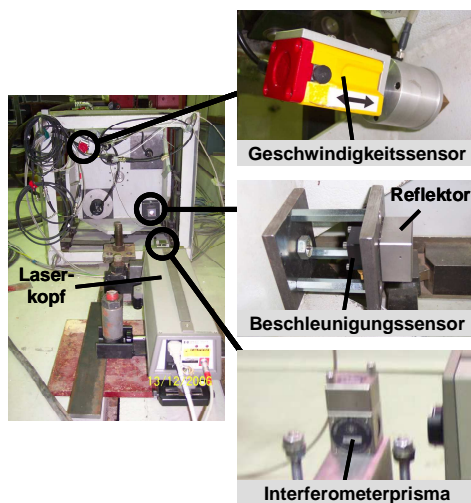
FSO = Full Scale Output (= Messbereichsende), $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$

Für die Schwingungsuntersuchungen wurden die Sensoren auf einem hydraulisch gesteuerten Vibrationstisch der Professur für Baumechanik der Bauhaus-Universität Weimar montiert, siehe Abbildung 4, und einer näherungsweise sinusförmig verlaufenden Bewegung in horizontaler Richtung ausgesetzt. Entsprechend dem für Bauwerksschwingungen relevanten Frequenzbereich von bis zu 10 Hz wurde die Frequenz der Schwingung variiert im Bereich von 0,2 Hz bis zu 10 Hz bei Amplituden von 0,2 mm bis 5,0 mm. Die Parameter der durchgeführten Versuchsreihen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Parameter der Versuchsreihen

Versuchsreihe	Schwingfrequenz [Hz]	Amplitude [mm]	Messfrequenz [Hz]	Integrationszeit [s]
0	0,2 bis 10	5	1000	20
1	0,6 bis 10	5	5000	5
2	0,2 bis 10	5	200	20
3	0,5	0,6 bis 5	1000	20
4	1	0,2 bis 5	1000	20

Für die Ermittlung der analogen Sensorendaten wurde die PCI-Messkarte der Firma National Instruments des Typs NI 6024E eingesetzt (NATIONAL INSTRUMENTS 2006). Mit einem Input-Bereich von $\pm 0,05$ Volt bis ± 10 Volt können damit bis zu 16 analoge Eingangskanäle erfasst werden. Mit einer Erfassungsgeschwindigkeit von maximal 200.000 Kanälen pro Sekunde werden die analogen Messwerte mit einer Auflösung von 12 bits digitalgewandelt. Nach dem Datenblatt können die Eingangssignale im Bereich von ± 10 V mit einer absoluten Genauigkeit von 16,5 mV, im Bereich von ± 5 V mit einer von 5,3 mV und im Bereich $\pm 0,5$ V mit einer von 0,8 mV erfasst werden. Die Auflösung beträgt dabei 0,008 mV. Die Genauigkeit der Messwerterfassung ist nicht für alle untersuchten Sensoren optimal. Für z. B. den Kistler-Sensor mit einer Auflösung von $2,5 \mu\text{g}$ bei einer Empfindlichkeit von $1\,500 \text{ mV/g}$ wäre eine Genauigkeit in der Spannungsmessung von $0,004 \text{ mV}$ anzustreben gewesen, also um den Faktor 1000 genauer. Durch die begrenzte Genauigkeit der Messwerterfassung können systematische Messabweichungen resultieren.

**Abb. 4:** Versuchsaufbau

Abbe'sche Komparatorprinzip (ABBE 1890) eingehalten wurde. Etwaige Verkippungen des Vibrationstisches während der Bewegungsvorgänge könnten die Messwerte der anderen Sensoren entsprechend ihrer Abstände von der Laserachse des Interferometers beeinträchtigen.

Die Genauigkeitsanalyse der Schwingensensoren soll aus dem Vergleich der aus den Sensorsignalen berechneten Wegwerte zu den tatsächlichen Wegwerten abgeleitet werden. Für die Bestimmung der tatsächlichen Wegänderungen wurde das Laserinterferometersystem HP 5528A eingesetzt, dessen Reflektor auf dem Vibrationstisch montiert war, siehe Abbildung 4. Das Interferometerprisma wurde mit dem Fußboden fest verbunden. Mit dem Laserinterferometer können die Wegänderungen auch unter Einbeziehung von meteorologischen Veränderungen innerhalb der Messdauer von 30 Sekunden mit einer Genauigkeit von $< 0,01 \text{ mm}$ – also im Vergleich zu den aus den Schwingensensorsignalen abgeleiteten Wegänderungen quasi fehlerfrei – bestimmt werden. Der Reflektor des Interferometers und der Kistler-Sensor waren auf dem Vibrationstisch so montiert, dass das

4 Berechnung der Wegwerte aus Beschleunigungsmessungen

Die Berechnung der Wegwerte aus Beschleunigungsmessungen wird exemplarisch anhand von Messwerten des Beschleunigungssensors Typ 8330A2.5 der Firma Kistler gezeigt. Der dargestellte Versuch wurde mit einer Messfrequenz von 1000 Hz durchgeführt, der Vibrationsstisch wies eine Schwingfrequenz von 1,5 Hz auf und die Amplitude der Schwingung betrug 5 mm. Die Integrationszeit zur Berechnung der Wegwerte betrug 20 Sekunden. Eine detaillierte Auswertung aller in Tabelle 2 aufgeführten Versuchsreihen ist in (SCHWANEBECK 2007) zu finden.

Um aus den gemessenen Beschleunigungen a_i ($i = 1, \dots, n$), wobei mit n die Anzahl der Messwerte bezeichnet ist, die gesuchten Wegwerte y_i zu erhalten, ist eine zweifache Integration der Messwerte erforderlich. Da die zu integrierende Funktion nur als begrenzte Anzahl von Abtastpunkten in diskreten Zeitabständen Δt vorliegt, kommen numerische Integrationsverfahren zum Einsatz. Häufig angewendete Verfahren, siehe z. B. (BRONSTEIN et al. 1995, S. 760ff), sind das Rechteckverfahren, die Trapezformel, die Simpson-Formel und das Verfahren von Romberg, die sich durch die Art der Interpolation zwischen den Abtastpunkten unterscheiden. Je nach gewähltem Verfahren resultiert ein Integrationsfehler, der die Genauigkeit der berechneten Wegwerte beeinflusst. In diesem Beitrag wird die Trapezformel verwendet; der Vergleich unterschiedlicher Integrationsverfahren ist Gegenstand weiterer Untersuchungen. Unter Verwendung der Trapezformel erhält man die gesuchten Wegwerte aus der in (SCHWARZ 2006) angegebenen Formel

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

Mit dieser Rekursionsformel lässt sich aus den beiden Vorgängerwerten y_{i-1} und y_i sowie den Beschleunigungswerten a_i und dem Zeitintervall Δt der folgende Wegwert y_{i+1} berechnen. Die ersten Werte für $i = 1$, also y_0 und y_1 , können zunächst frei gewählt werden, z. B. $y_0 = y_1 = 0$. Die willkürliche Festlegung der Werte y_0 und y_1 führt zu systematischen Verfälschungen der berechneten Wegwerte mit einem linearen Verlauf, die durch nicht erfasste Offset- und Driftwerte der Beschleunigungswerte mit den sich daraus ergebenden charakteristischen Systematiken überlagert werden. Das Ergebnis der Integration zeigt Abbildung 5. Es ist zu erkennen, dass die willkürlichen Annahmen für y_0 und y_1 und systematische Messabweichungen zu stark verfälschten Wegwerten führen.

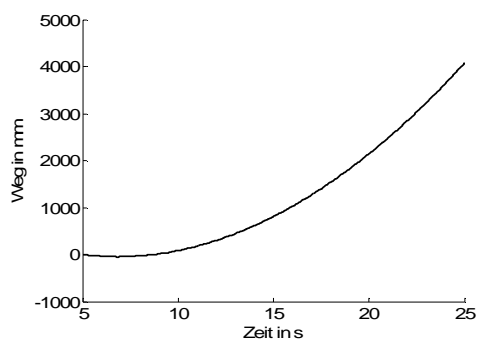


Abb. 5: Wegwerte aus integrierten Beschleunigungsmessungen

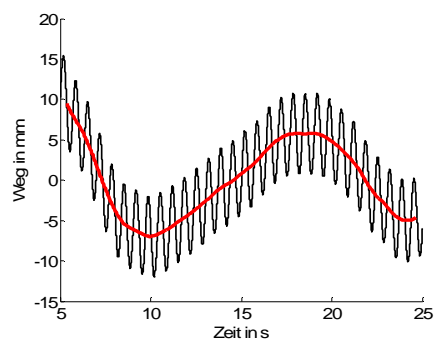


Abb. 6: Wegwerte nach Abzug einer ausgleichenden Parabel, Trendlinie

Um die Wegwerte von den genannten Einflüssen zu befreien, wurde eine ausgleichende Parabel berechnet und von den Wegwerten abgezogen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 6. Man erkennt deutlich einen langwelligen Trend, um den die Daten weiterhin zu reduzieren sind. Um diesen Trend zu berechnen, wurde eine gleitende Mittelwertfilterung, siehe z. B. (WELSCH et al. 2000, S. 361ff), mit der Filterlänge

$$2l = \frac{\text{Messfrequenz}}{\text{Schwingfrequenz}} \quad (2)$$

durchgeführt. Die mit Hilfe der gleitenden Mittelwertbildung berechnete Trendlinie ist in Abbildung 6 eingezeichnet. Subtrahiert man diesen Trend von den Wegwerten, erhält man das Ergebnis in Abbildung 7.

Anmerkungen: Die Berechnung der Filterlänge mit Hilfe von Gleichung (2) war in den durchgeführten Versuchen problemlos möglich, da die Schwingfrequenz a priori bekannt war. In der Praxis ist die Schwingfrequenz zunächst durch eine Zeitreihenanalyse zu bestimmen. Im Falle überlagerter Schwingungen tritt das Problem auf, eine sachgerechte Schwingung für die Berechnung der Filterlänge auszuwählen. Zudem ist anzumerken, dass das hier gewählte zweistufige Verfahren, in dem zuerst eine Parabel und danach eine Trendlinie von den Messwerten abgezogen wird, durch ein einstufiges Verfahren, bei dem die Trendlinie aus den originären Beschleunigungswerten berechnet wird, ersetzt werden kann. Das zweistufige Verfahren bietet jedoch den Vorteil, dass man anhand der Trendlinie einen detaillierteren Einblick in das Verhalten des Sensors über den Messzeitraum erhält.

Der Beschleunigungssensor und das Interferometer wurden auf Zuruf gestartet. Der dadurch entstandene zeitliche Offset von wenigen Zehntelsekunden in den Zeitreihen der Wegwerte wurde durch eine Kreuzkorrelationsanalyse, siehe (WELSCH et al. 2000, S. 327ff) bestimmt. Nach der zeitlichen Synchronisation können die berechneten Wegwerte mit der Referenzmessung durch das Interferometer verglichen werden. Die Differenzen der Wegwerte zeigt Abbildung 8. Der Mittelwert der Differenzen beträgt null; die Standardabweichung beträgt 0,06 mm.

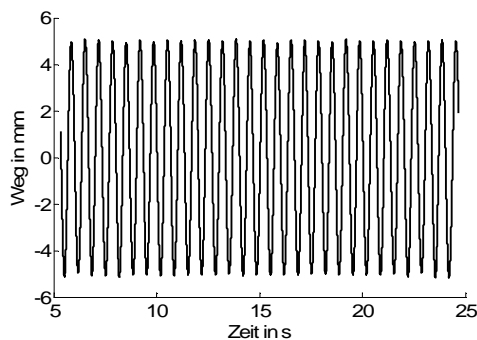


Abb. 7: Vom Trend befreite Wegwerte

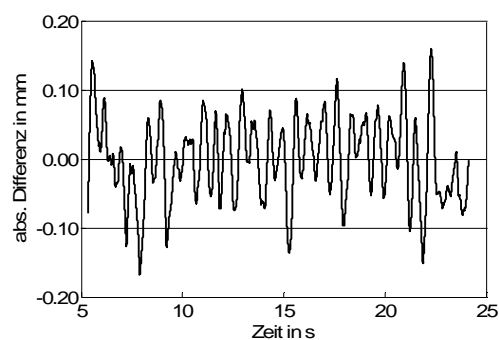


Abb. 8: Differenzen der Wegwerte

Mit der vorgestellten Auswertestrategie wurden mehrere Versuchsreihen von Beschleunigungsmessungen, siehe Tabelle 2, ausgewertet, wobei in allen Versuchsreihen derselbe Übertragungsfaktor verwendet wurde². Die Ergebnisse³ sind in den Abbildungen 9 bis 14 dargestellt, wobei auf der y-Achse jeweils die Standardabweichung der aus den Beschleunigungsmessungen berechneten Wegwerte aufgetragen ist. Anzumerken ist, dass die Mittelwertfilterung bei einigen Datensätzen zweimal durchgeführt werden musste, um die Daten vollständig von Trendercheinungen zu befreien.

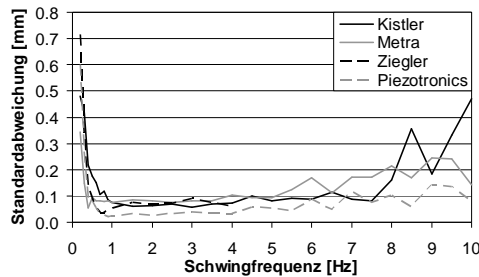


Abb. 9: Versuchsreihe 0

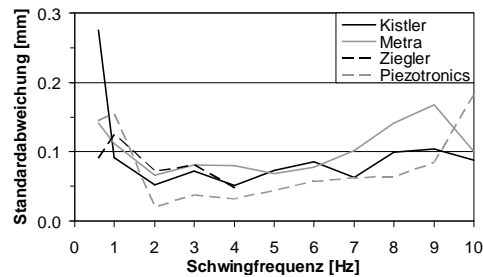


Abb. 10: Versuchsreihe 1

Die Ergebnisse können wie folgt interpretiert werden:

Versuchsreihe 0: Für Schwingfrequenzen von 0,7 bis 5 Hz liefern alle Sensoren Wegwerte deren Standardabweichung $\leq 0,1$ mm ist, wobei der Piezotronics-Sensor die geringsten Standardabweichungen liefert. Für Schwingfrequenzen > 5 Hz ist für alle Sensoren eine Zunahme der Standardabweichung zu verzeichnen, die beim Piezotronics-Sensor am geringsten und beim Kistler-Sensor am größten ausfällt. Nähert man sich mit einer Schwingfrequenz von 0,2 Hz der unteren Grenze des Frequenzbereichs der Sensoren, siehe Tabelle 1, ist bei allen Sensoren ein sprunghafter Anstieg der Standardabweichung der berechneten Wegwerte zu verzeichnen. Der Grund dafür kann in einer Drift des Übertragungsfaktors bei niedrigen Frequenzen liegen, als weitere Ursache kommt die so genannte „Anzeigeabweichung“ in Frage, bei deren Vorhandensein die tatsächliche Beschleunigung nicht mit dem angezeigten Wert übereinstimmt⁴.

Versuchsreihe 1: Erhöht man im Vergleich zur Versuchsreihe 0 die Messfrequenz von 1000 auf 5000 Hz und setzt zugleich die Integrationszeit von 20 auf 5 Sekunden herab, erhält man bei Schwingfrequenzen von 2 bis 7 Hz Wegwerte, deren Standardabweichung $\leq 0,1$ mm ist. Für Schwingfrequenzen > 7 Hz ist ein Anstieg der Standardabweichungen zu

² Laborkalibrierungen (SPEKTRA 2005) haben gezeigt, dass der Übertragungsfaktor in geringem Maße frequenzabhängig ist, wobei Änderungen $> 5\%$ (bezogen auf eine Schwingfrequenz von 16 Hz) erst bei Frequenzen > 60 Hz auftreten.

³ Aufgrund des geringen Messbereichs von $\pm 0,3$ g, siehe Tabelle 1, konnten für den Sensor ACF 24 S der Firma ZINS Ziegler nicht alle Versuchsreihen komplett ausgewertet werden.

⁴ Beide Phänomene sind in Laborkalibrierungen (SPEKTRA 2005) festgestellt worden.

verzeichnen, ebenso ist eine Zunahme der Standardabweichungen festzustellen, wenn sich die Schwingfrequenz der unteren Grenze des Frequenzbereichs der Sensoren nähert.

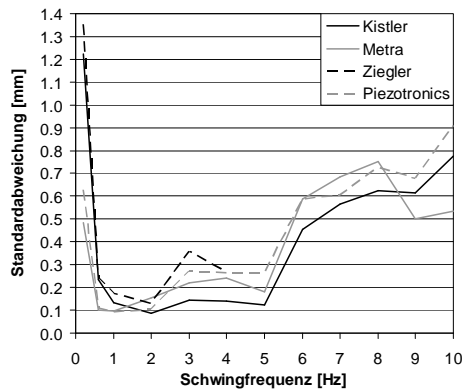


Abb. 11: Versuchsreihe 2

Versuchsreihe 2: Setzt man im Vergleich zur Versuchsreihe 0 die Messfrequenz auf 200 Hz herab, erhält man bei Schwingfrequenzen von 0,6 bis 5 Hz Standardabweichungen für die berechneten Wegwerte von bis zu 0,35 mm. Bei Schwingfrequenzen > 5 Hz ist ein starkes Anwachsen der Standardabweichungen bis zu 0,9 mm festzustellen⁵. Nähert sich die Schwingfrequenz der unteren Grenze des Frequenzbereichs der Sensoren, ist wieder ein sprunghafter Anstieg der Standardabweichungen zu verzeichnen. Im Vergleich zur Versuchsreihe 0 hat die geringere Messfrequenz bewirkt, dass die Standardabweichungen der berechneten Wegwerte im Mittel um mehr als Faktor 3 größer sind.

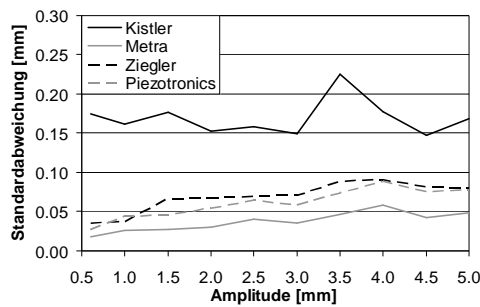


Abb. 12: Versuchsreihe 3

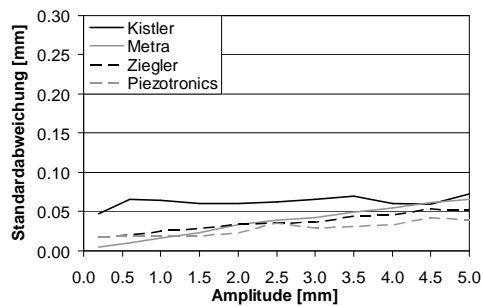


Abb. 13: Versuchsreihe 4

Versuchsreihe 3: In dieser Versuchsreihe wurde, wie in der Versuchsreihe 0, eine Messfrequenz von 1000 Hz und eine Integrationszeit von 20 Sekunden gewählt. Im Gegensatz zur Versuchsreihe 0 wurde mit einer konstanten Schwingfrequenz von 0,5 Hz gearbeitet, die Amplitude der Schwingungen wurde von 0,6 bis 5 mm variiert. Man erkennt, dass die Standardabweichungen der Wegwerte mit zunehmender Schwingungsamplitude zunehmen, wobei der Metra-Sensor die geringsten und der Kistler-Sensor die größten Standardabweichungen liefert.

⁵ Da bei drei Sensoren gleichermaßen ein starkes Anwachsen der Standardabweichungen der berechneten Wegwerte für Schwingfrequenzen > 5 Hz zu verzeichnen ist, können Einflüsse aus dem Versuchsaufbau oder der Datenauswertung nicht ausgeschlossen werden.

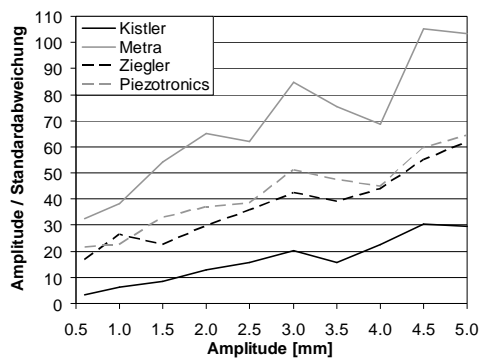


Abb. 14: Signifikanz der berechneten Schwingwege

Schwingungen wurde im Bereich von 0,2 bis 5 mm variiert, die Schwingfrequenz betrug 1 Hz. Es ist ersichtlich, dass die Standardabweichung der berechneten Schwingwege für alle Sensoren über die gesamte Versuchsreihe $< 0,08$ mm ist. Der Kistler-Sensor liefert die größten Standardabweichungen, die sich über die gesamte Versuchsreihe nahezu konstant ergeben, bei den übrigen Sensoren ist eine Zunahme der Standardabweichung bei größer werdenden Amplituden zu verzeichnen. Bildet man den Quotienten aus Amplitude und Standardabweichung der Wegwerte, stellt man wie in der Versuchsreihe 3 fest, dass die Signifikanz der berechneten Wegwerte mit zunehmender Amplitude größer wird. Die Schwingwege konnten mit allen Sensoren hochsignifikant bestimmt werden.

Ein aussagekräftigeres Bild erhält man, indem man die Amplituden durch die Standardabweichungen der Wegwerte dividiert. Dann stellt man fest, siehe Abbildung 14, dass, obwohl die Standardabweichungen mit zunehmender Amplitude größer werden, die Signifikanz der berechneten Schwingwege deutlich ansteigt. Mit allen Sensoren konnten die Schwingwege hochsignifikant bestimmt werden. Für den Kistler-Sensor gilt diese Aussage erst ab einer Schwingungsamplitude von 1 mm.

Versuchsreihe 4: In dieser Versuchsreihe wurde erneut eine Messfrequenz von 1000 Hz und eine Integrationszeit von 20 Sekunden gewählt, die Amplitude der

5 Berechnung der Wegwerte aus Geschwindigkeitsmessungen

Im Gegensatz zu Beschleunigungssensoren, die für einen weiten Bereich von Schwingfrequenzen einen nahezu konstanten Übertragungsfaktor aufweisen, ist dieser Faktor, mit dem die Umrechnung der gemessenen Spannungen in Geschwindigkeiten erfolgt, bei dem verwendeten Schwingungssensor Geophone SM-6 stark frequenzabhängig. In Abbildung 15 ist dieses Verhalten aus der Kalibrierung des Sensors, siehe (SPEKTRA 2005), ersichtlich.

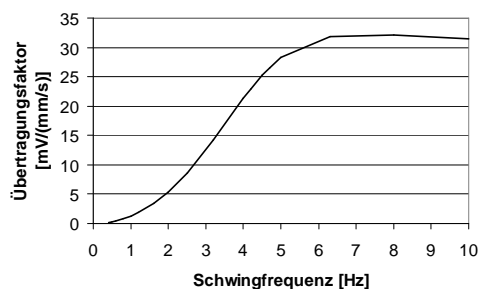


Abb. 15: Übertragungsfaktoren

Aus diesem Grund wurden die Zeitreihen der Geschwindigkeitsmessungen, die zunächst mit einem einheitlichen Übertragungsfaktor aufgezeichnet wurden, mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation, siehe z. B. (WELSCH et al. 2000, S. 348ff), in den Frequenzbereich überführt. Die Amplituden aller im Frequenzspektrum vorliegenden Frequenzen wurden dann unter Verwendung der zugehörigen Übertragungsfaktoren umgerechnet; danach erfolgte die Rücktransformation in den Zeitbereich.

Aus den korrigierten Zeitreihen der Geschwindigkeiten v_j können dann die gesuchten Wegwerte y_m ($m = 2, \dots, n$) durch eine numerische Integration nach der Trapezregel mit

$$y_m = \left[\frac{v_1 + v_m}{2} + \sum_{j=2}^{m-1} v_j \right] \cdot \Delta t \quad (3)$$

berechnet werden, siehe (SCHWARZ 2006), wobei mit n die Anzahl der Messwerte bezeichnet ist. Die Berechnung der Wegwerte wird exemplarisch anhand eines Versuches mit einer Messfrequenz von 1000 Hz, einer Schwingfrequenz von 1 Hz und einer Schwingungsamplitude von 5 mm gezeigt. Die Integrationszeit betrug 20 Sekunden. Eine detaillierte Auswertung aller Versuchsreihen ist wieder in (SCHWANEBECK 2007) aufgeführt.

Die mit (3) berechneten Wegwerte zeigt Abbildung 16. Der Trend in Form einer ansteigenden Geraden deutet auf eine systematische Verfälschung des Ergebnisses durch eine Nullpunktverschiebung (Offset) des Sensors hin. Um die Wegwerte von diesem Einfluss zu befreien, wurde eine ausgleichende Gerade berechnet und von den Wegwerten abgezogen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 17. Man erkennt deutlich einen langwelligen Trend, der ebenfalls von den Daten abzuziehen ist, was mit der in Abschnitt 4 beschriebenen Mittelwertfilterung erfolgte. Die resultierende Trendlinie ist ebenfalls in Abbildung 17 dargestellt.

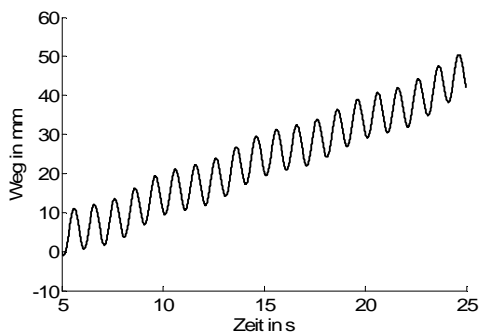


Abb. 16: Wegwerte aus integrierten Geschwindigkeitsmessungen

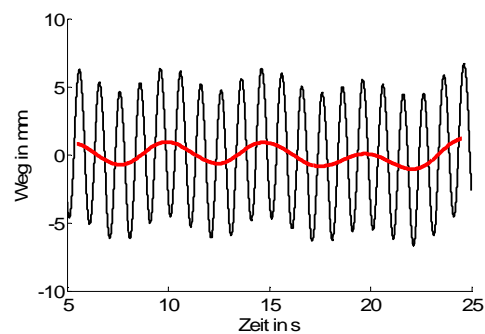


Abb. 17: Wegwerte nach Abzug einer ausgleichenden Geraden, Trendlinie

Subtrahiert man diesen Trend von den Wegwerten, erhält man das Ergebnis in Abbildung 18. Die Anmerkungen aus Abschnitt 4 zur Berechnung der Filterlänge und zur Trendbereinigung der Daten gelten analog für die Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen.

Der zeitliche Offset zwischen der Zeitreihe der integrierten Wegwerte und der Referenzmessung mit dem Interferometer wurde durch eine Kreuzkorrelationsanalyse bestimmt. Nach der zeitlichen Synchronisation können die berechneten Wegwerte mit der Referenzmessung verglichen werden. Die Differenzen der Wegwerte zeigt Abbildung 19. Der Mittelwert der Differenzen beträgt null, die Standardabweichung beträgt 0,29 mm.

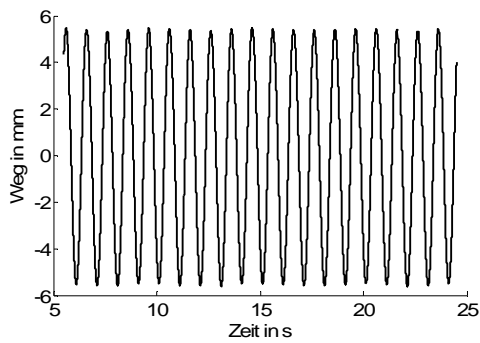


Abb. 18: Vom Trend befreite Wegwerte

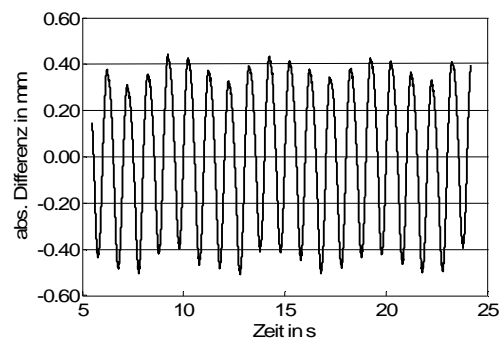


Abb. 19: Differenzen der Wegwerte

Mit der beschriebenen Vorgehensweise wurden die in Tabelle 2 aufgeführten Versuchsreihen ausgewertet, wobei Versuche mit einer Schwingfrequenz $< 0,4$ Hz nicht ausgewertet werden konnten, da für diesen Bereich keine Übertragungsfaktoren gegeben waren. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 20 und 21 dargestellt.

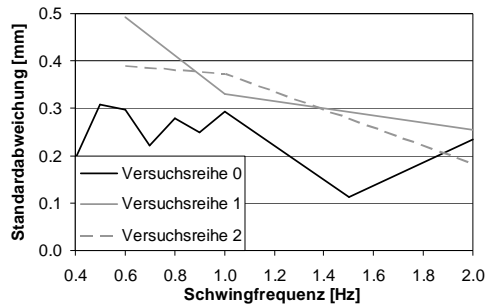


Abb. 20: Versuchsreihen 0, 1 und 2

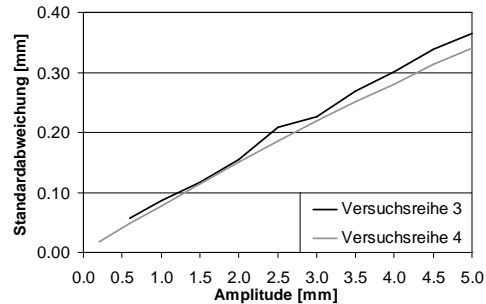


Abb. 21: Versuchsreihen 3 und 4

Die Ergebnisse können wie folgt interpretiert werden:

Versuchsreihen 0, 1 und 2: In diesen Versuchsreihen, siehe Tabelle 2, konnten lediglich die Versuche mit einer Schwingfrequenz ≤ 2 Hz ausgewertet werden. Oberhalb dieses Wertes wiesen die originären Messdaten an einigen Stellen große Sprünge auf, deren Ursache nicht geklärt werden konnte. In der Versuchsreihe 0 mit einer Messfrequenz von 1000 Hz und einer Integrationszeit von 20 Sekunden liegen die Standardabweichungen der berechneten Wegwerte zwischen 0,1 und 0,3 mm. Erhöht man in Versuchsreihe 1 die Messfrequenz auf 5000 Hz und setzt gleichzeitig die Integrationszeit auf 5 Sekunden herab, erhält man bei allen untersuchten Schwingfrequenzen eine höhere Standardabweichung der Wegwerte. Ein ähnliches Ergebnis erhält man in Versuch 2, in dem mit einer Messfrequenz von 200 Hz und einer Integrationszeit von 20 Sekunden gearbeitet wurde. Tendenziell werden in allen Versuchsreihen die Standardabweichungen der Wegwerte mit zunehmender Schwingfrequenz kleiner.

Versuchsreihen 3 und 4: In den Versuchsreihen 3 und 4 wurde jeweils mit einer Messfrequenz von 1000 Hz und einer Integrationszeit von 20 Sekunden gearbeitet. In der Versuchsreihe 3 wurden bei einer konstanten Schwingfrequenz von 0,5 Hz die Amplituden im Bereich von 0,6 bis 5 mm variiert, in der Versuchsreihe 4 wurden die Amplituden bei einer konstanten Schwingfrequenz von 1 Hz im Bereich von 0,2 bis 5 mm variiert. In beiden Versuchsreihen erkennt man einen nahezu linearen Anstieg der Standardabweichungen der berechneten Wegwerte mit zunehmender Amplitude. Dividiert man die Amplituden durch die Standardabweichungen der Wegwerte so stellt man fest, dass trotz zunehmender Standardabweichungen die Signifikanz der berechneten Wegwerte ansteigt. In beiden Versuchsreihen konnten die Schwingwege hochsignifikant bestimmt werden.

6 Schlussbetrachtung und Ausblick

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass sich aus Beschleunigungsmessungen Wegwerte berechnen lassen, die in einigen Versuchen eine Standardabweichung von besser als 0,1 mm aufweisen. Diese beeindruckende Genauigkeit konnte erreicht werden, da es sich um Laborversuche handelte, bei denen die Schwingfrequenz a priori bekannt war und somit eine Trendbereinigung der Daten problemlos möglich war. In der Praxis wird insbesondere bei überlagerten Schwingungen das Problem der sachgerechten Filterung der Daten auftreten, so dass es fraglich ist, ob die berechneten Wegwerte mit den in diesem Beitrag vorgestellten Genauigkeiten ermittelt werden können.

Um aus Schwinggeschwindigkeitsmessungen Wegwerte zu berechnen, sind die Zeitreihen zunächst in den Frequenzbereich zu transformieren, um die frequenzabhängigen Übertragungsfaktoren anzubringen. Nach der Rücktransformation in den Zeitbereich sind dann die Trendscheinungen in den Daten, analog zur Auswertung von Beschleunigungsmessungen, zu eliminieren. Die berechneten Wegwerte weisen in den durchgeführten Versuchen Standardabweichungen auf, die durchschnittlich um mehr als Faktor drei über denen der entsprechenden Wegwerte aus den Beschleunigungsmessungen liegen.

Aufgrund der durchgeführten Versuche scheint es grundsätzlich möglich, Schwingwege im Submillimeterbereich aus Beschleunigungsmessungen und ab ca. 1 mm aus Geschwindigkeitsmessungen signifikant zu berechnen. Aufgrund der geringeren Standardabweichungen der berechneten Wegwerte und der Tatsache, dass über einen weiten Frequenzbereich mit einem einheitlichen Übertragungsfaktor gearbeitet werden kann, lassen den Einsatz von Beschleunigungssensoren vorteilhafter gegenüber Geschwindigkeitssensoren erscheinen. Da aber lediglich ein Geschwindigkeitssensor für die Untersuchungen zur Verfügung stand, kann diese Aussage nicht verallgemeinert werden. Inwieweit sich die gezeigten Genauigkeiten unter realen Messbedingungen erzielen lassen, kann durch Schwingwegmessungen an Bauwerken unter Einbeziehung von Messungen mit dem Laserinterferometer geklärt werden.

Danksagung: Die Autoren bedanken sich bei Dr. Zabel und Dipl.-Ing. Gramse (Professur Baumechanik) sowie Dr. Ehlert (Professur Experimentelle Konstruktions- und Materialanalyse) für die Unterstützung während der Versuche und für wertvolle Hinweise zur Auswertung der Messdaten.

Literatur

- Abbe, E. (1890): Messapparate für Physiker. In: Zeitschrift für Instrumentenkunde 10(1890), Seite 446-447
- Bronstein, I.N., Semendjajew, K.A., Musiol, G., Mühlig, H. (1995): Taschenbuch der Mathematik. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt am Main
- Geier, R., Lutz, H. (2002): Überwachungskonzept für Talsperren auf Basis ambientser Schwingungsmessungen. Internationales Symposium Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau 2002, Zürich
- Geophone (2006): Internetpräsent der Firma Input/Output Inc. unter www.geophone.com, Stand 23.12.2006
- Kistler (2003): Datenblatt des kraftkompensierten kapazitiven Beschleunigungssensors vom Typ 8330A2.5 der Firma Kistler Instrumente GmbH, Ostfildern unter www.kistler.com/medias/VfJ3E6V9egWxP85D8YwBEd-30.pdf, Stand 23.12.2006
- Metra (2003): Datenblatt des Beschleunigungsaufnehmers KB12V der Firma Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e. K. unter <http://www.scantekinc.com/datasheets/kb12.pdf>, Stand 23.12.2006
- National Instruments (2006): Datenblatt zur Low-Cost E-Serie unter www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc202-204_ETC_212-213.pdf, Stand 23.12.2006
- Petzsche, Th., Müller, H. (2006): Beschleunigung. In: Gevatter, H.-J., Grünhaupt, U. (Hrsg.): Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin 2006
- Piezotronics (2006): Datenblatt der Firma PCB Piezotronics Inc., Vibration Division, unter www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/products/Manuals/393A03.pdf, Stand 23.12.2006
- Profos, P., Pfeifer, T. (Hrsg.) (1992): Handbuch der industriellen Messtechnik. 5. Auflage, Oldenbourg Verlag; München, Wien 1992
- Schwanebeck, T. (2007): Untersuchungen zur Genauigkeit von Schwingwegmessungen mit Hilfe von Schwingbeschleunigungs- und Schwinggeschwindigkeitssensoren für Aufgabenstellungen in der Ingenieurgeodäsie. Diplomarbeit am Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik der TU Berlin in Kooperation mit der Professur Geodäsie und Photogrammetrie der Bauhaus-Universität Weimar, unveröffentlicht
- Schwarz, W. (2006): Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von Brückenbauwerken mittels Laserinterferometer. In: VDI-Berichte Nr. 1941, Baudynamik Tagung Kassel, 17. und 18. Mai 2006, S. 155-168, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf
- Spektra (2005): Werkskalibrierscheine der Beschleunigungssensoren PCB 393A03 und Metra KB12V vom 22.11.2005 bzw. 23.11.2005 sowie des Geschwindigkeitssensors Geophone SM-6 vom 22.11.2005, Spektra Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden, unveröffentlicht
- Welsch, W., Heunecke, O., Kuhlmann, H. (2000): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg
- Ziegler (2006): Datenblatt der Firma ZINS Ziegler-Instruments GmbH unter www.ziegler-instruments.de und unter www.cqm.de/pages/ziegler/sensor.htm, Stand 23.12.2006