

# Berechnung von Verschiebungen mittels Zeit-Integration gemessener Beschleunigungen: Eine kleine Untersuchung

Glauco Feltrin, Daniel Gsell und Felix Weber

Abteilung Ingenieur-Strukturen  
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA)  
Dübendorf, Schweiz

## 1. EINFÜHRUNG

Um Schnittkräfte und Spannungen in einem Bauwerk zu kennen, ist vielfach die Messung der Verschiebungen erforderlich. Die moderne Messtechnik bietet verschiedene Verfahren zur genauen und zuverlässigen Erfassung von Verschiebungen. Die Anwendung dieser Verfahren an Bauwerken z.B. Brücken und Hochkaminen ist in der Regel aufgrund der grossen Dimensionen aufwendig, zeitraubend und teuer, da Verschiebungen immer bezüglich eines ortsfesten Referenzpunktes gemessen werden müssen.

Im Gegensatz zur Verschiebung ist die Beschleunigung immer eine absolute Grösse. Daher entfällt die Notwendigkeit von Referenzpunkten. Da Beschleunigungsmessungen mit geringem Aufwand verbunden sind, ist es daher sehr verlockend, Verschiebungen aus gemessenen Beschleunigungen zu ermitteln. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die gemessenen Beschleunigungen numerisch integriert werden müssen, um daraus Geschwindigkeiten und schliesslich Verschiebungen zu berechnen. Dieser Artikel geht auf einige Probleme ein, die mit der numerischen Integration von gemessenen Beschleunigungen verbunden sind.

## 2. THEORETISCHE ASPEKTE

### 2.1 Grundsätzliche Zusammenhänge

Die Berechnung der Verschiebung  $d_c(t)$  aus einer gemessenen Beschleunigung  $a(t)$  ist sehr einfach und ergibt sich zu

$$d_c(t) = \int_0^t dt \int_0^\tau a(\tau) d\tau + v_0 t + d_0, \quad (1)$$

wobei  $v_0$  und  $d_0$  die Anfangswerte der Geschwindigkeit und der Verschiebung zur Zeit  $t=0$ , d. h. zu Beginn der Messung, sind.  $v_0$  und  $d_0$  müssen durch unabhängige Messungen ermittelt werden. Dies erzeugt einen zusätzlichen messtechnischen Aufwand, welcher das ganze Verfahren in Frage stellt. Es ist daher wichtig, dass sich das Bauwerk bei  $t=0$  in der Ruhelage befindet. Das heisst, dass  $v_0=0$  und  $d_0=0$  sind. Darüber hinaus gilt auch  $a(0)=0$ . Dies bedeutet, dass sich die Verschiebung  $d_c(t)$  auf die Ruhelage bezieht, die bei  $t=0$  herrscht. Selbstverständlich kann auch der Zeitpunkt  $t=t_{end}$  beim Abschluss der Messung als Referenz verwendet werden, falls sich das Bauwerk zu diesem Zeitpunkt in einer Ruhelage befindet. Die Zeit-Integration wird rückwärts in der Zeit durchgeführt. Bei baodynamischen Anwendungen stellt die Voraussetzung der Ruhelage zur Zeit  $t=0$  oder  $t=t_{end}$  in der Regel keine Einschränkung dar.

## 2.2 Numerische Zeit-Integration

Formel (1) beschreibt die Zeit-Integration eines kontinuierlichen (analogen) Messsignals. In der modernen Messtechnik liegen die Messsignale meist in digitaler Form vor: Eine Zeitreihe  $a(i)$  ( $i = 0 \dots N$ ) aus endlich vielen Messwerten  $N + 1$ , die in einem regelmässigen Zeitabstand  $\Delta t$  aus dem analogen Messsignal gewonnen wurden.  $a(i)$  ist der Wert der Beschleunigung zum Zeitpunkt  $t(i) = i \cdot \Delta t$ . Diese Zeitreihe gilt es numerisch zu integrieren. Ist die Abtastfrequenz  $f_s = 1/\Delta t$  genügend gross im Vergleich zu den wichtigen Schwingungskomponenten der Messreihe, so erzeugt die einfache Trapezregel bereits sehr genaue Ergebnisse. Die Zeit-Integration wird dabei in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird aus der gemessenen Beschleunigung rekursiv die Geschwindigkeit berechnet:

$$v_c(i+1) = \frac{a(i+1) + a(i)}{2} \Delta t + v_c(i). \quad (2)$$

Im zweiten Schritt wird mit der Zeitreihe (2) und dem gleichen Algorithmus die Verschiebung berechnet:

$$d_c(i+1) = \frac{v_c(i+1) + v_c(i)}{2} \Delta t + d_c(i). \quad (3)$$

Aufgrund der Anfangsbedingung gilt bei  $t = 0$ :  $v_c(0) = 0$  und  $d_c(0) = 0$ .

## 2.3 Zeit-Integration als Filter

Die Zeit-Integration kann im Wesentlichen als Filter interpretiert werden. Die wichtigsten Eigenschaften der Integration lassen sich anhand der Filter-Darstellung erläutern.

### 2.3.1 Analoges Integrations-Filter

Die Darstellung der analytischen (analogen) Integration im Frequenzbereich lautet

$$h(\omega) = -\frac{j}{\omega}. \quad (4)$$

Der Amplituden- und Phasengang dieses analogen Filters sind in Abb. 1. dargestellt. Das Filter verstärkt die tieffrequenten und reduziert die hochfrequenten Komponenten eines Signals. Darüber hinaus erfahren alle harmonischen Komponenten des Signals eine konstante Phasenverschiebung um  $-90^\circ$ . Das heisst, das Signal wird durch die Integration nicht verzerrt. Eine Sinus-Schwingung mit Amplitude 1 wird in eine Cosinus-Schwingung mit Amplitude  $-1/\omega$  verwandelt:

$$\sin(\omega t) \xrightarrow{h(\omega)} -\frac{1}{\omega} \cos(\omega t). \quad (5)$$

Für die Frequenz  $\omega = 0$  ist das Integrations-Filter nicht definiert, da die Amplitude unendlich gross wird. Ein Signal darf daher keine Komponenten mit der Frequenz Null aufweisen. Einfacher ausgedrückt: Das Signal darf keine endliche konstante Komponente haben (z.B. eine konstante Beschleunigung), da diese Komponente bei der Integration einen Beitrag leistet, der linear mit der Zeit zunimmt und somit beliebig gross wird.

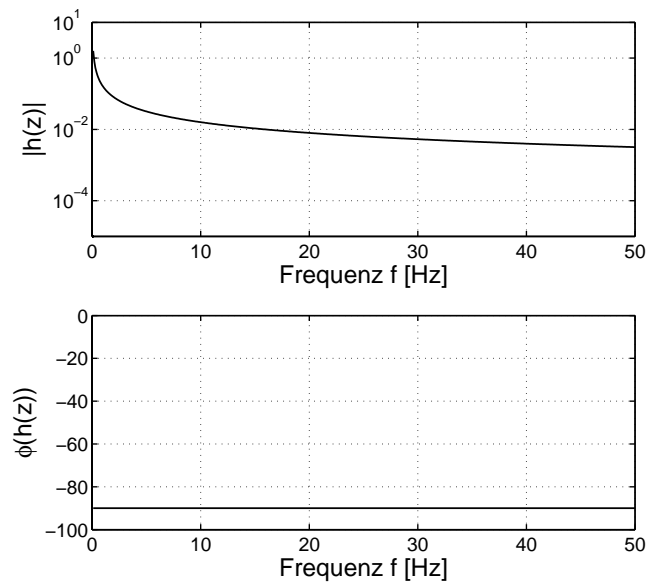


Abb. 1: Amplituden- und Phasengang des analogen Integrations-Filters aus Gleichung (4).

### 2.3.2 Digitales Integrations-Filter

Der in Formel (2) definierte Algorithmus führt zu einem digitalen Filter. Dieses lautet

$$h(z) = \frac{\Delta t}{2} \frac{z+1}{z-1}, \quad (6)$$

wobei  $z$  als

$$z = e^{j\omega\Delta t} = e^{j\omega / f_s} \quad (7)$$

definiert ist. Der Amplituden- und Phasengang dieses Filters sind in Abb. 2. dargestellt. Die Abtastrate beträgt 100 Hz. Die Phasenverschiebung des digitalen Integrations-Filters ist konstant und genau gleich wie die des analogen Integrations-Filters ( $-90^\circ$ ). Das digitale Filter führt deshalb auch zu keiner Verzerrung des Signals. Der Amplitudengang des Filters weicht hingegen vom analogen Integrations-Filter ab. Die Abweichung nimmt vor allem oberhalb von 20 Hz sehr stark zu. Das digitale Filter schwächt die hochfrequenten Komponenten des Signals stärker ab als das analoge Filter. Die Abweichung hängt im Wesentlichen von der Abtastrate ab. Wird diese z.B. auf 500 Hz erhöht, so ist die Abweichung im Frequenzbereich 0...100 Hz sehr klein (siehe Abb. 3). Indem die Abtastrate erhöht wird, approximiert das digitale Filter immer besser das analoge Filter. Die numerische Integration wird immer genauer. Die Abtastrate sollte daher so gewählt werden, dass der wichtige Frequenzbereich möglichst korrekt approximiert wird.

Das digitale Integrations-Filter hat eine Singularität bei  $z=1$ . Dies entspricht der Frequenz  $\omega=0$ . Bei dieser Frequenz hat somit das digitale Integrations-Filter die gleichen Eigenschaften wie das analoge Integrations-Filter. Das digitale Filter (6) integriert eine konstante Komponente des Signals exakt.

Ein digitales Integrations-Filter ist kein Anti-Aliasing Filter. Ein Filter mit einer Abtastrate von 100 Hz verstärkt eine harmonische Signalkomponente mit einer Frequenz von 99 Hz genau gleich wie eine mit einer Frequenz von 1 Hz. Dies ist eine Folge der Periodizität der Beziehung  $z(\omega)$  aus Gleichung (7) (siehe Abb. 3). Die Periode ist von der Abtastrate abhängig und beträgt  $\omega = 2\pi f_s = 2\pi / \Delta t$ .

### 3. MESSTECHNISCHE ASPEKTE

Die im Abschnitt 2.3 dargelegten Betrachtungen zeigen deutlich das Hauptproblem der praktischen Anwendung der Zeit-Integration auf: Die Singularität bei  $\omega=0$  und die sich daraus ergebende starke Verstärkung der tieffrequenten Komponenten des Signals. Als tieffrequent werden Schwingungen mit einer Frequenz bezeichnet, die deutlich kleiner als 1 Hz sind. Treten bei diesen Frequenzkomponenten kleine Messfehler auf, so können diese so stark verstärkt werden, dass dadurch das Resultat verfälscht wird. Tieffrequente Schwingungen bewirken sehr kleine Beschleunigungen: Eine harmonische Schwingung mit der Frequenz  $\omega$  und der Verschiebungsamplitude  $d$  ruft eine Beschleunigung mit einer Amplitude  $a$  gemäß der Gleichung

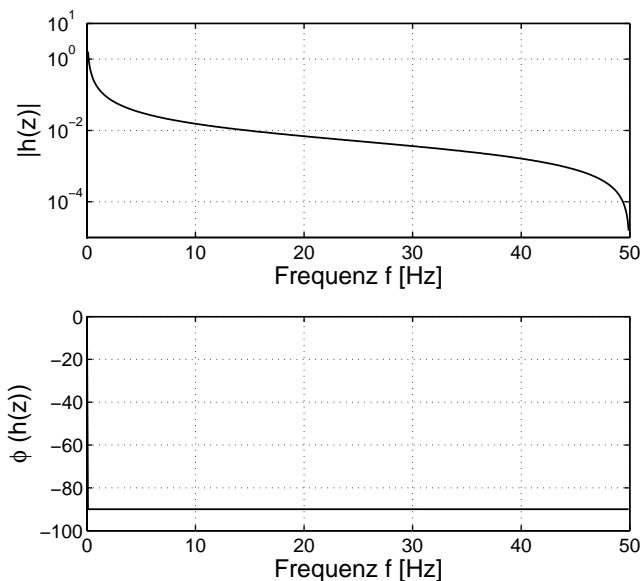


Abb. 2: Amplituden- und Phasengang des digitalen Integrations-Filters aus Gleichung (6).

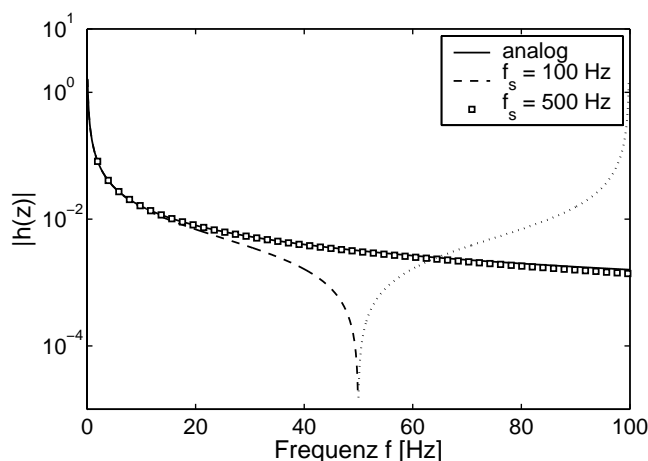


Abb. 3: Amplitudengang des digitalen Integrations-Filters aus Formel (6) in Abhängigkeit der Abtastfrequenz.

$$a = d\omega^2 \quad (8)$$

hervor. Eine harmonische Schwingung mit einer Amplitude von einem Millimeter und einer Frequenz von 0.1 Hz ruft eine grösste Beschleunigung von ca.  $4 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-2}$  hervor. Eine angemessene Erfassung des Zeitverlaufs dieser harmonischen Schwingung erfordert daher eine Auflösung von etwa  $5 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$ . Dieser Sachverhalt stellt sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit einer Beschleunigungsmessung.

### 3.1 Piezoelektrische Beschleunigungssensoren

Die weit verbreiteten piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer mit integrierter Elektronik sind in der Regel nicht geeignet, solch tieffrequente Schwingungen mit der erforderlichen Genauigkeit zu erfassen. Die Eignung wird nicht durch die Auflösung sondern durch den nutzbaren Frequenzbereich beschränkt. Die Empfindlichkeit dieser Beschleunigungsaufnehmer nimmt unterhalb einer gerätespezifischen Eckfrequenz rapide ab. Tieffrequente Schwingungen werden deshalb unterdrückt. Der Einsatz piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer ist daher nur dann sinnvoll, wenn tieffrequente Schwingungen vernachlässigt werden können. Zur Messung transienter Verschiebungen an schwach gedämpften Strukturen sind piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer durchaus geeignet, da die Bewegung der Struktur durch die Eigenschwingungen dominiert wird. Selbstverständlich müssen die Eigenfrequenzen der massgebenden Eigenschwingungen innerhalb des nutzbaren Frequenzbereichs der eingesetzten Sensoren liegen. Darüber hinaus muss auch das Frequenzspektrum der einwirkenden Kräfte innerhalb dieses nutzbaren Frequenzbereichs sein. Bei diesen Anwendungen können die tieffrequenten Anteile der gemessenen Beschleunigung und der berechneten Geschwindigkeit und Verschiebung mit einem Hochpassfilter eliminiert werden, um grobe Fehler bei der Integration zu vermeiden.

### 3.2 Kraftkompensierte Beschleunigungssensoren

Ist die korrekte Erfassung tieffrequenter Schwingungskomponenten wichtig, so muss die Messung mit Beschleunigungssensoren durchgeführt werden, die tieffrequente Schwingungen erfassen können. Für geophysikalische Anwendungen („strong motion“-Netzwerke) sind z. B. kraftkompensierte Beschleunigungssensoren im Einsatz, die eine sehr hohe Auflösung bis zu einigen hundertstel Hertz aufweisen. Selbst mit diesen Präzisionsgeräten ist die Bestimmung der Verschiebung aus der gemessenen Beschleunigung nicht unproblematisch (Boore, 2001). Diese Sensoren haben jedoch Abmessungen von einigen Dezimetern und können bis zu 30 kg wiegen. Sie sind daher für strukturdynamische Anwendungen nicht geeignet. Auf dem Markt sind auch handlichere kraftkompensierte Sensoren erhältlich, die auch bei sehr kleinen Schwingungsfrequenzen gute Auflösungs-eigenschaften aufweisen. Diese Sensoren sind weit verbreitet aber leider auch recht teuer.

### 3.3 Kapazitive Beschleunigungssensoren

In den letzten Jahren kommen immer mehr so genannte kapazitive Beschleunigungs-Sensoren auf den Markt. Diese werden mikro-maschinell aus Siliziumteilen hergestellt und sind daher sehr klein und leicht (Elwenspoek und Wiegerink, 2001). Die Kosten sind in der Regel auch geringer als jene vergleichbarer kraftkompensierter Sensoren. Der Frequenzbereich kapazitiver Beschleunigungssensoren mit hoher Auflösung erstreckt sich von 0 Hz bis zu mehreren Hundert Hz. Diese Sensoren messen somit auch eine konstante Beschleunigung und eignen sich deshalb gut zur Erfassung tieffrequenter Schwingungen. Der Messbereich von Sensoren mit hoher Auflösung beträgt ca.  $\pm 50 \text{ ms}^{-2}$ . Sie sind deshalb für baodynamische

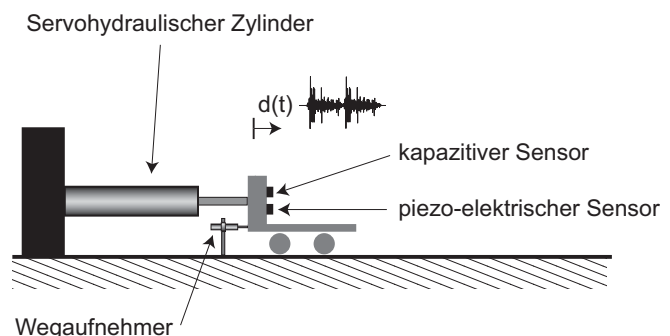


Abb. 4: Schemazeichnung der Versuchseinrichtung.

Anwendungen gut geeignet. Die offene Frage ist, wie empfindlich sie im tieffrequenten Frequenzbereich tatsächlich sind, da die kleine seismische Masse und das unvermeidliche Signalrauschen der Sensoren die genaue Messung kleinster Beschleunigungen erschwert. Diese Frage soll nun mit Versuchen untersucht werden.

## 4. VERSUCHE

### 4.1 Versuchseinrichtung

Die Versuche wurden mit dem horizontalen Schwingungserreger der Abteilung Ingenieur-Strukturen der EMPA durchgeführt (siehe Abb. 4). Der Schwingungserreger, der durch einen servo-hydraulischen Zylinder angetrieben wird, wurde als Rütteltisch betrieben. Eine Steuereinheit regelt die Verschiebung des Zylinders gemäss einem vorgegebenen Sollwertsignal. Dieses wird als digitales Zeitsignal in einer Datei gespeichert und vom Regler eingelesen. An der Masse des Schwingungserregers wurde ein kapazitiver Sensor mit einem Messbereich von  $\pm 2g$  angebracht. Als Referenzgrösse wurde die Verschiebung der Masse relativ zum festen Boden mit einem induktiven Wegaufnehmer gemessen. Alle Messgrössen wurden über ein so genanntes „DC-coupling“ erfasst. Bei der Signalaufbereitung ist daher kein Hochpassfilter eingesetzt worden, da dieses die Rekonstruktion der Verschiebung aus der Beschleunigung verunmöglicht hätte.

### 4.2 Resultate

#### 4.2.1 „Halbsinus“-Verschiebung

Das erste Sollwertsignal für den Zylinderweg entspricht ungefähr einem Halbsinus und simuliert die vertikale, quasi-statische Durchbiegung einer Brücke bei der Durchfahrt eines schweren Fahrzeugs (z.B. LKW). Die Dauer und die Amplitude des Zeitsignals wurden variiert.

##### a) Amplitude: 10 mm

Abb. 5 zeigt die gemessene Verschiebung und Beschleunigung mit den zugehörigen Leistungsspektren eines Zeitsignals mit 2 Sekunden Dauer und 10 mm grösster Amplitude. Eine etwaige konstante Verschiebung der Nulllinie ist aus den gemessenen Signalen bereits entfernt worden. Die wesentlichen Spektralkomponenten des Zeitsignals der Verschiebung sind deutlich kleiner als 1 Hz. Die Spektralkomponenten weisen ein Maximum bei ca. 0.1 Hz auf.

Das Ergebnis der numerischen Integration der Beschleunigung ist in Abb. 6 zu sehen. Zum Vergleich wurde durch eine einfache numerische Ableitung der gemessenen Verschiebung ( $v(i) = (d(i) - d(i-1)) / \Delta t$ ) die Geschwindigkeit bestimmt. Die beiden berechneten Geschwindigkeiten stimmen gut überein. Die grösste Abwei-

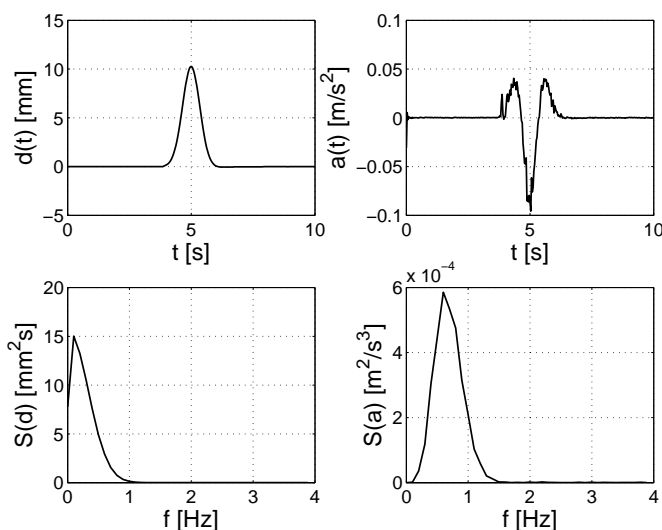


Abb. 5: Zeitverläufe und Leistungsspektren der gemessenen Verschiebung und Beschleunigung (Amplitude: 10 mm).

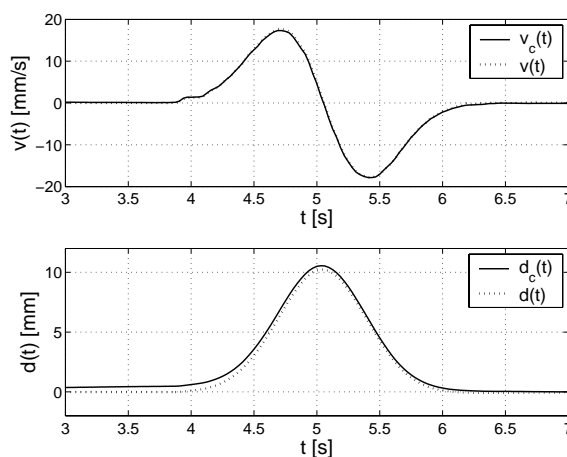


Abb. 6: Zeitverläufe der aus der Beschleunigung berechneten Geschwindigkeit und Verschiebung (Amplitude: 10 mm).

chung beträgt ca. 1mm/s. Die berechnete Verschiebung stimmt wegen der 2. numerischen Integration weniger gut mit der gemessenen überein. Die grössten Abweichungen treten zwischen 3 und 5 Sekunden auf und betragen ca. 0.6 mm. Die Abweichungen treten wegen einer tieffrequenten Störung in der berechneten Verschiebung auf.

Wie kann nun diese Störung entfernt werden? Die Verwendung eines Hochpass-Filters führt zu keinem befriedigenden Resultat, da in der Regel kein stabiles Filter konstruiert werden kann, das solch tieffrequente Störungen unterdrückt ohne das gesamte Signal zu verzerren. Ein einfaches und im vorliegenden Fall effizientes Verfahren besteht darin, die Störung in den Zeitintervallen links und rechts des Hauptsignals (Ruhelagen) durch eine Polynomfunktion n-ten Grades  $p_n(t)$  zu approximieren (z.B. durch die Methode der kleinsten Quadrate). Im Bereich des Hauptsignals wird die Polynomfunktion verwendet, um die Werte der Störung zu interpolieren. Die Polynomfunktion wird von der berechneten Verschiebung subtrahiert. Dies ergibt die korrigierte berechnete Verschiebung

$$d_{cc}(t) = d_c(t) - p_n(t). \tag{9}$$

Im vorliegenden Beispiel sind für die Approximation einer Polynomfunktion fünften Grades links und rechts vom Hauptsignal 120 Wertepaare verwendet worden. Die Korrektur ist sowohl für die berechnete Geschwindigkeit wie auch für die Verschiebung durchgeführt worden. Das Ergebnis ist in Abb. 7 dargestellt. Bei der Geschwindigkeit ist keine wesentliche Verbesserung ersichtlich. Eine deutlich bessere Übereinstimmung ist hingegen bei der Verschiebung zu erkennen. Die grösste Abweichung zur gemessenen Verschiebung konnte durch die Korrektur auf unter 0.1 mm reduziert werden.

**b) Amplitude: 1 mm**

Wird die maximale Amplitude der aufgebrauchten Verschiebung auf einen Millimeter reduziert, so treten auch etwa 10-fach kleinere Beschleunigungen auf. Das Zeitsignal der Beschleunigung ist nicht mehr ganz so glatt wie beim vorhergehenden Beispiel (siehe Abb. 8). Das Leistungsspektrum zeigt Signalkomponenten zwischen 1.5 und 3.5 Hz, die im vorhergehenden Beispiel nicht auftraten. Diese Signalkomponenten sind vermutlich auf die Zylinder-Steuerung zurückzuführen. Die

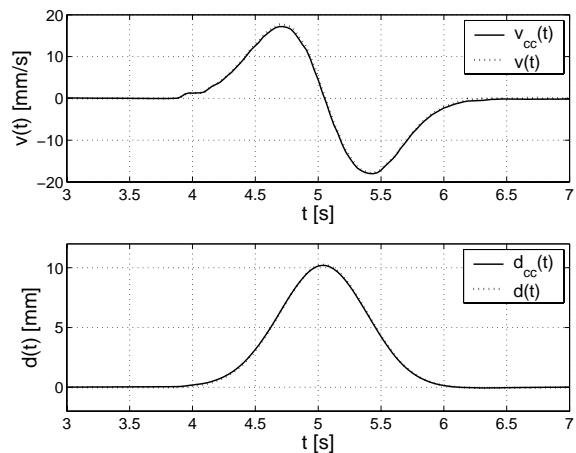


Abb. 7: Zeitverläufe der mit einer Polynomfunktion korrigierten berechneten Geschwindigkeit und Verschiebung (Amplitude: 10 mm).

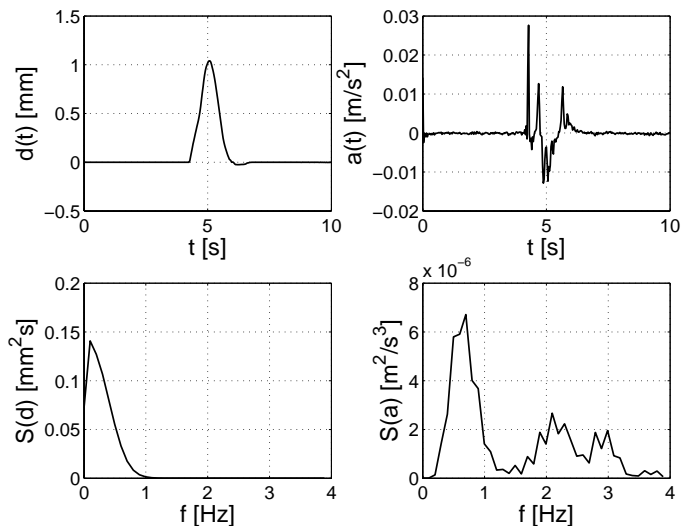


Abb. 8: Zeitverläufe und Leistungsspektren der gemessenen Verschiebung und Beschleunigung (Amplitude: 1 mm).

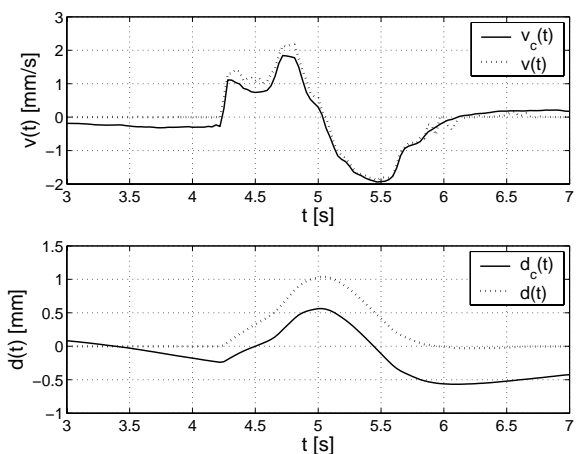


Abb. 9: Zeitverläufe der mit der Beschleunigung berechneten Geschwindigkeit und Verschiebung.

numerisch integrierte Geschwindigkeit und Verschiebung sind recht ungenau (siehe Abb. 9). Die grösste Abweichung zur gemessenen Verschiebung beträgt wiederum ca. 0.6 mm. Wiederum sind sehr tieffrequente Störungen für die Ungenauigkeit verantwortlich. Aufgrund der wesentlich kleineren Verschiebungen (1 mm anstatt 10 mm) ist der Einfluss der Störung viel grösser.

Abb. 10 zeigt jedoch, dass sich die Korrektur mit der Polynomfunktion auch bei diesem Beispiel bewährt. Die grösste Abweichung zur gemessenen Verschiebung wird auf unter 0.03 mm reduziert. Die Geschwindigkeit wurde mit einem Polynom siebten Grades und die Verschiebung mit einem Polynom fünften Grades korrigiert. Die Abweichungen bei der Geschwindigkeit sind im Verhältnis grösser. Die Abweichungen rühren jedoch

von relativ hochfrequenten Störungen her, die bei der 2. numerischen Integration auf die Verschiebung nicht weiter ins Gewicht fallen.

#### 4.2.2 „Transiente“-Verschiebung

Das zweite aufgebrachte Sollwertsignal entspricht einer transienten Verschiebung mit stark tieffrequenten Anteilen (siehe Abb. 11). Die Dauer des Zeitsignals beträgt 30 Sekunden und ist wesentlich länger als die Dauer des im vorhergehenden Abschnitt behandelten Sollwertsignals. Die grösste Amplitude der Verschiebung beträgt 1.2 mm und die dominanten Spektralkomponenten der Verschiebung treten unterhalb von 0.5 Hz auf. Die grösste gemessene Beschleunigung beträgt ca.  $0.06 \text{ ms}^{-2}$ . Die dominanten Spektralkomponenten der Beschleunigung befinden sich zwischen 1 und 4 Hz. Im Vergleich dazu sind die Spektralkomponenten der Beschleunigung unterhalb 0.5 Hz eher bescheiden (siehe Abb. 11).

Die aus der gemessenen Beschleunigung berechneten Geschwindigkeit und Verschiebung wurden auch mit einer Polynomfunktion korrigiert. Da dieses Zeitsignal keinen Vor- und Nachlauf aufweist, ist die jeweilige Polynomfunktion im Bereich des relevanten Zeitsignals bestimmt worden ( $t = 0 \dots 30$  Sekunden). Sowohl für die Geschwindigkeit wie auch für die Verschiebung wurden einfache Polynome ersten Grades verwendet.

Die durch numerische Integration berechnete und korrigierte Geschwindigkeit weicht nur wenig von der Geschwindigkeit ab, die durch numeri-

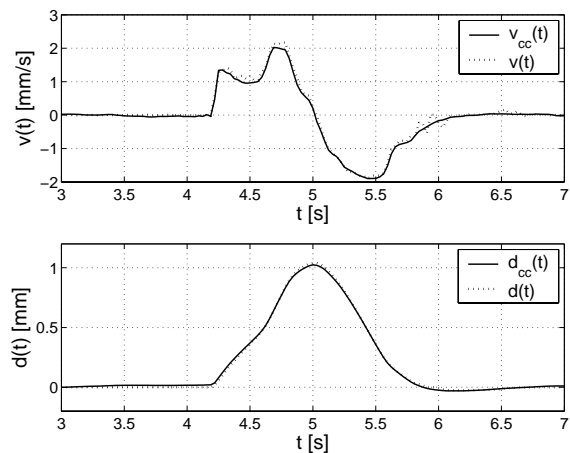


Abb. 10: Zeitverläufe der mit einer Polynomfunktion korrigierten berechneten Geschwindigkeit und Verschiebung (Amplitude: 1 mm).

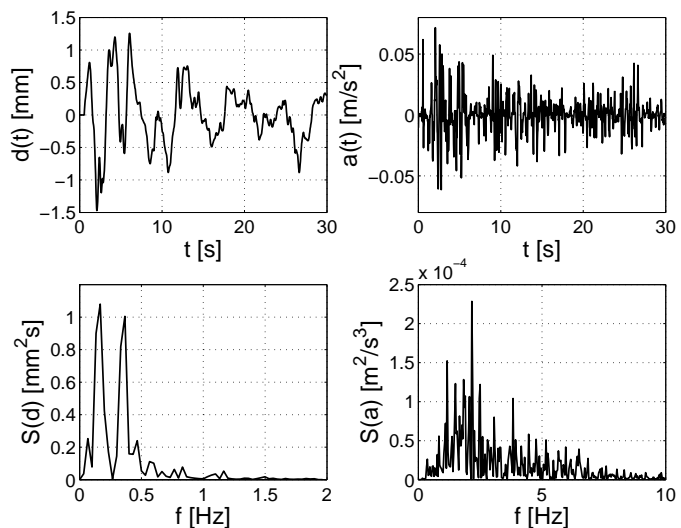


Abb. 11: Zeitverläufe und Leistungsspektren der gemessenen Verschiebung und Beschleunigung.

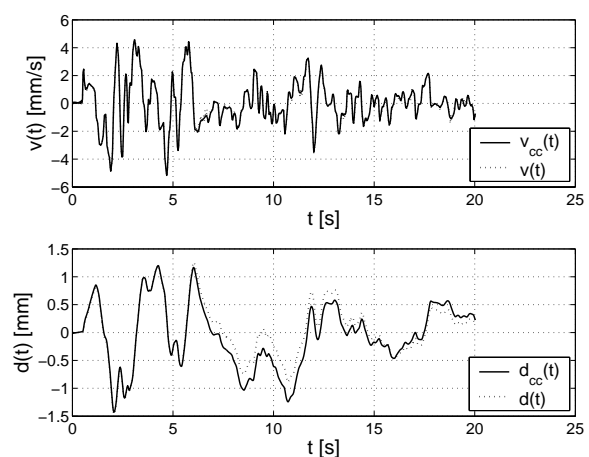


Abb. 12: Zeitverläufe der aus der Beschleunigung berechneten Geschwindigkeit und Verschiebung.

sche Differentiation der Verschiebung berechnet wurde (siehe Abb. 12). Die Standardabweichung der Differenz der beiden Zeitsignale beträgt ca.  $0.13 \text{ mms}^{-1}$ . Die berechnete Verschiebung weist hingegen wesentlich grössere Abweichungen von der gemessenen ab. Die ersten 6 Sekunden des berechneten Zeitsignals sind zwar sehr genau. Danach treten aber grössere Abweichungen zwischen der berechneten und der gemessenen Verschiebung auf. Die grösste Abweichung beträgt ca. 0.4 mm. Aufgrund des fehlenden Vor- und Nachlaufs kann keine weitergehende Verbesserung erreicht werden. Insgesamt ist das erzielte Ergebnis immer noch befriedigend.

## 5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Genauigkeit von Geschwindigkeit und Verschiebung, die durch numerische Integration einer gemessenen Beschleunigung berechnet werden, wird durch mehrere Faktoren beeinflusst:

- Die Beschleunigung muss mit einem Sensor gemessen werden, der im Frequenzbereich, in welchem die dominanten Spektralkomponenten der Verschiebung auftreten, ein genügend hohes Auflösungsvermögen aufweist. Kraftkompensierte und kapazitive Beschleunigungssensoren sind grundsätzlich dazu geeignet, da ihr Messbereich auch eine konstante Beschleunigung umfasst.
- Während der Messung dürfen keine analogen oder digitalen Hochpassfilter eingesetzt werden, da diese unter Umständen wichtige Signalanteile unterdrücken. Dadurch können grosse Fehler in der berechneten Geschwindigkeit und Verschiebung auftreten.
- Die Berechnung der Geschwindigkeit ist in der Regel weniger heikel als die Berechnung der Verschiebung, da nur einmal numerisch integriert werden muss und das Geschwindigkeitssignal grundsätzlich höhere dominante Spektralkomponenten aufweist als die Verschiebung. Diese werden von Beschleunigungssensoren in der Regel auch genauer erfasst.
- Sowohl die Geschwindigkeit wie auch die Verschiebung weisen Störungen mit sehr kleinen Frequenzen auf, die durch die begrenzte Auflösung der Beschleunigungssensoren und der starken Amplifikation des Integrations-Filters verursacht werden. Die Genauigkeit der berechneten Geschwindigkeit und Verschiebung hängt wesentlich davon ab, wie stark diese Störungen sind.
- In der Regel können diese Störungen nicht durch digitale Hochpassfilter unterdrückt werden, da kein stabiles Filter konstruiert werden kann, das solch tieffrequente Störungen unterdrückt ohne das gesamte Signal zu verzerren.
- Die Störungen im integrierten Signal können durch Anwendung von Polynom-Funktionen reduziert werden. Die Bestimmung der Polynom-Funktionen erfolgt anhand der Anteile der Zeitreihe, die vor und nach dem Hauptsignal auftreten. Ist die Dauer der Anteile der Zeitreihe vor und nach dem Hauptsignal von ähnlicher Dauer wie das Hauptsignal, so kann die Genauigkeit der integrierten Signale wesentlich verbessert werden. Voraussetzung dazu ist, dass vor und nach dem Hauptsignal die Struktur die gleiche Ruhelage einnimmt.

## 6. LITERATUR

Boore, D.M. (2001). *Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake*. Bulletin of the Seismological Society of America, 91(5): p. 1199-1211.

Elwenspoek, M. und Wiegerink, R. (2001). *Mechanical Microsensors*. Microtechnology and MEMS Series, Springer-Verlag, Berlin.