

# **Schwingungsaufnehmer: Welcher Sensor für welche Anwendung?**

Dr. A. Ziegler, ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich

---

# 1 Einführung

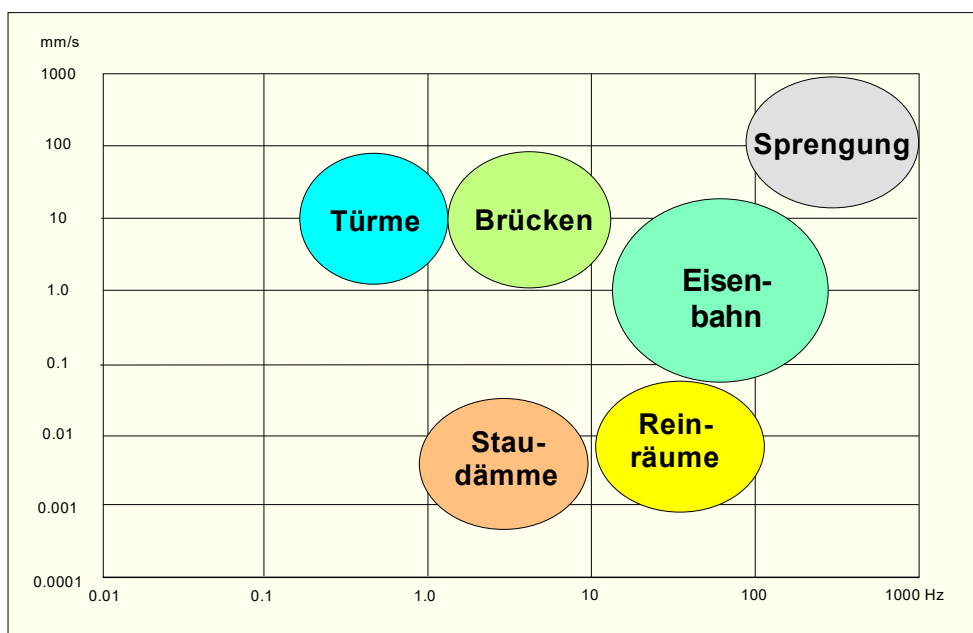
Die Messaufgaben im Bereich Erschütterungsmessungen sind äusserst vielfältig. Bald sollten wir die Erschütterungen bei einer Präzisionsmaschine in der Grössenordnung von wenigen Tausendstel Millimeter pro Sekunde messen, dann wiederum die Schwinggeschwindigkeit bei Sprengungen mit Werten von mehreren hundert Millimeter pro Sekunde. Und für jede Aufgabe sollten wir den idealen Sensor zur Verfügung haben. Im folgenden wollen wir versuchen, einen Überblick über die verschiedenen Messaufgaben im Bereich Bauwerksdynamik zu erstellen und anhand von konkreten Messungen aufzuzeigen, welche Sensoren für welche Messaufgaben geeignet sind.

## 1.1 Messgrössen

Grundsätzlich lassen sich Schwingungen als Schwingweg ( $d$ ) als Schwinggeschwindigkeit ( $v$ ) oder als Schwingbeschleunigung ( $a$ ) messen und rein theoretisch lässt sich auch jede dieser drei Grössen aus einer der anderen zwei berechnen, d.h. aus dem Schwingweg erhalten wir durch eine erste Integration die Schwinggeschwindigkeit und durch eine weitere Integration die Beschleunigung. Umgekehrt können wir aus einer Beschleunigungsaufzeichnung durch Differentiation Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg berechnen. Die Wahl der Messgrösse würde - aufgrund dieser theoretischen Überlegung - gar keine Rolle spielen. In der Praxis jedoch haben die - immer vorhandenen - minimalen Mess- und Aufzeichnungsfehler einen sehr grossen Einfluss und können unsere Umrechnungen ganz entscheidend stören.

## 1.2 Messbereiche

Bei der Betrachtung des Messbereiches müssen wir unterscheiden zwischen Amplitudenbereich und Frequenzbereich. Die Schwingungen des Eiffelturms zum Beispiel liegen bei einigen Zentimeter mit einer Frequenz von 0.3 Hz, während die Schwingungen bei einer Sprengung im Bereich von einigen Tausendstel Millimeter liegt jedoch bei einer Frequenz von 100 bis 1000 Hz. Eine anschaulich Darstellung der uns interessierenden Messbereiche lässt sich mit einem logarithmischen Amplituden-Frequenz-Diagramm, wie es in Bild 1.1 wiedergegeben ist, erreichen. Die eingetragenen typischen Beispiele illustrieren, welch weiten Bereich unsere Messinstrumente abdecken sollten, um allen Messaufgaben gerecht zu werden.



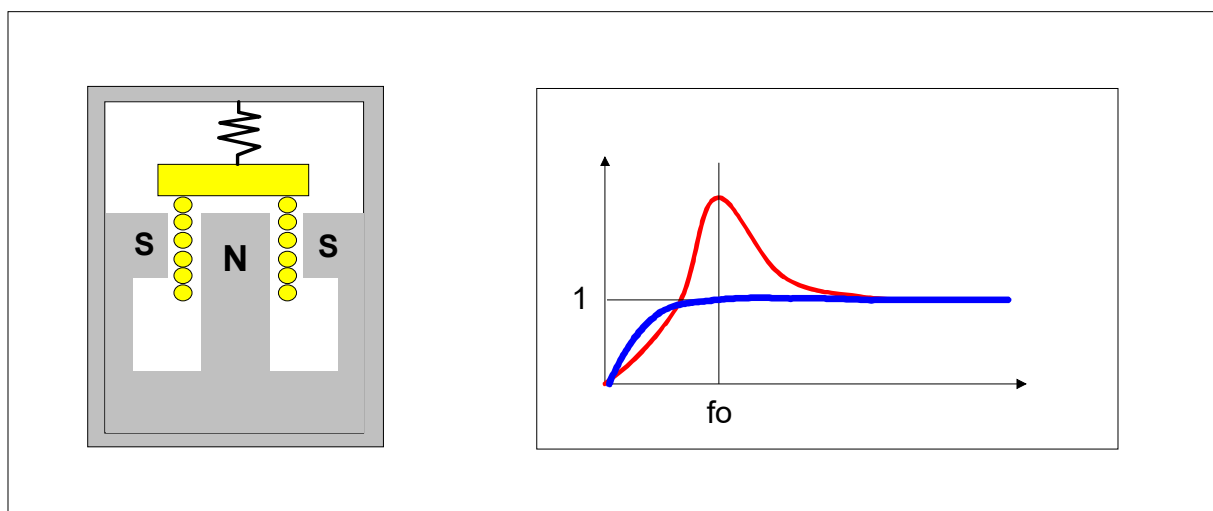
**Bild 1.1** Amplituden-Frequenz-Diagramm mit typischen Beispielen aus der Bauwerksdynamik

## 2 Messmethoden

In den vergangenen Jahrzehnten ist eine grosse Anzahl verschiedenster Methoden zur Messung von Schwingungsgrössen entwickelt worden und jedes Messprinzip hat seine spezifische Vorzüge. Im folgenden möchten wir am Beispiel von drei Messmethoden aufzeigen, wie Schwingungen gemessen werden können und wie sich das gewählte Messprinzip auf die Anwendungsmöglichkeiten auswirkt.

### 2.1 Elektromagnetisches Geophon

Ein Geophon funktioniert nach dem Prinzip des Lautsprechers d.h. eine Spule bewegt sich – wie in Bild 2.1 dargestellt - im ringförmigen Spalt eines Magneten. Der ringförmige Magnet mit dem Nordpol N im Zentrum und dem Südpol S als Ring erzeugt ein radiales Magnetfeld im ringförmigen Spalt. Die Spule, aufgehängt an einer Feder, kann sich vertikal bewegen und schneidet dabei die magnetischen Feldlinien. Dadurch wird eine Spannung induziert, die proportional zur Geschwindigkeit ist, mit der sich die Spule relativ zum Magneten bewegt.



**Bild 2.1** Schematische Darstellung des Geophons (links); Response-Kurve unkorrigiert und korrigiert (rechts)

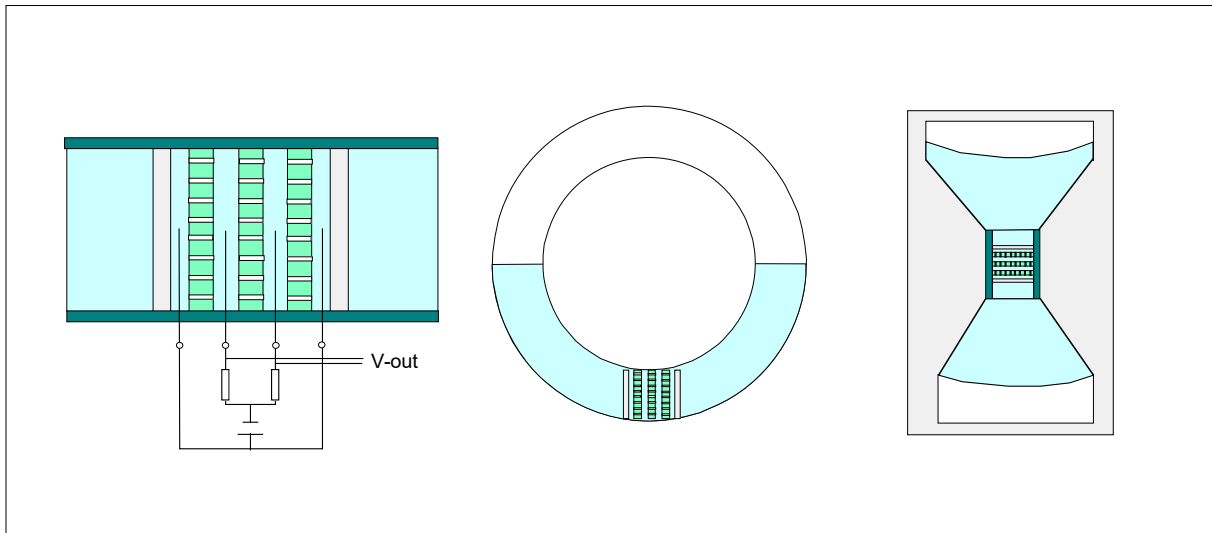
Das Schwingverhalten der Spule entspricht dem einer elastisch aufgehängten Masse. Und da die bei der Induktion entstehende Bremskraft wie eine Dämpfung wirkt, verhält sich die Spule wie ein klassischer, gedämpfter Ein-Massen-Schwinger mit der bekannten Resonanzkurve mit der Überhöhung im Bereich der Eigenfrequenz. Durch die richtige Wahl von Eigenfrequenz und Dämpfung und mittels aufwendiger elektronischer Korrekturen lässt sich aus der Resonanzkurve in Bild 2.1 eine linearisierte Resonanzkurve erzeugen, sodass das Geophon – ab einer vorgegebenen Frequenz – ein exakt geschwindigkeits-proportionales Spannungssignal abgibt.

Aus dieser Beschreibung des Funktionsprinzips wird deutlich, dass das Geophon zwar ein idealer Sensor für zyklische Bewegungen, bei denen der Körper immer wieder in die Ausgangslage zurückkehrt, darstellt, dass aber bleibende Verschiebungen nicht erfasst werden können. Weitere Einschränkungen ergeben sich aus der unteren Frequenzgrenze und aus der bauartbedingten Begrenzung des Schwingwegs der Spule.

### 2.2 Molekular-Elektronische Messzelle

Während das Geophon die Schwingung einer elastisch aufgehängten Masse ausnützt, um die Schwinggeschwindigkeit zu bestimmen, verwendet die Molekular-Elektronische Messzelle (MEM) die Schwingung einer Flüssigkeit. Bild 2.2 zeigt eine stark vereinfachte Skizze einer solchen MEM. Drei Filterplatten mit mikroskopischen Kappillaren sind in einem Keramikrohr

eingebaut, welches mit einem speziellen Elektrolyt gefüllt ist. Elektroden zwischen den Filterplatten dienen als Anoden und Kathoden. Wird eine Spannungsquelle angelegt, fließt ein Strom, der sich nach kurzer Zeit stabilisiert, sodass die Spannung zwischen den beiden Anoden gleich null wird. Durch eine Beschleunigung parallel zur Rohrachse wird elektrolytische Flüssigkeit - und damit auch Ladungen - durch die Kapillaren gepresst, sodass sich eine Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden aufbaut. Die Spannung ist proportional zur Geschwindigkeit.



**Bild 2.2** Vereinfachte Skizze einer Molekular-Elektronischen Messzelle (links); Bauformen für horizontale und vertikale Schwingungsmessung (mitte bzw. rechts).

Das Besondere bei der MEM ist die enorme Auflösung und die Eignung zur Messung von extrem tiefen Frequenzen. Der im Kapitel 3 noch näher beschriebene Sensor WB2000 z.B. ist in der Lage Schwinggeschwindigkeiten von  $10^{-5}$  mm/s und Frequenzen von 0.03 Hz zu messen. Je nach gewünschter Messrichtung ist eine entsprechende Bauform für die Keramikröhre mit der Elektrolytflüssigkeit zu wählen: für horizontale Bewegungen wird ein ringförmiges Rohr (Torus), für vertikale Bewegungen ein vertikal gerichtetes Rohr mit elastischer Stützung der Flüssigkeit verwendet.

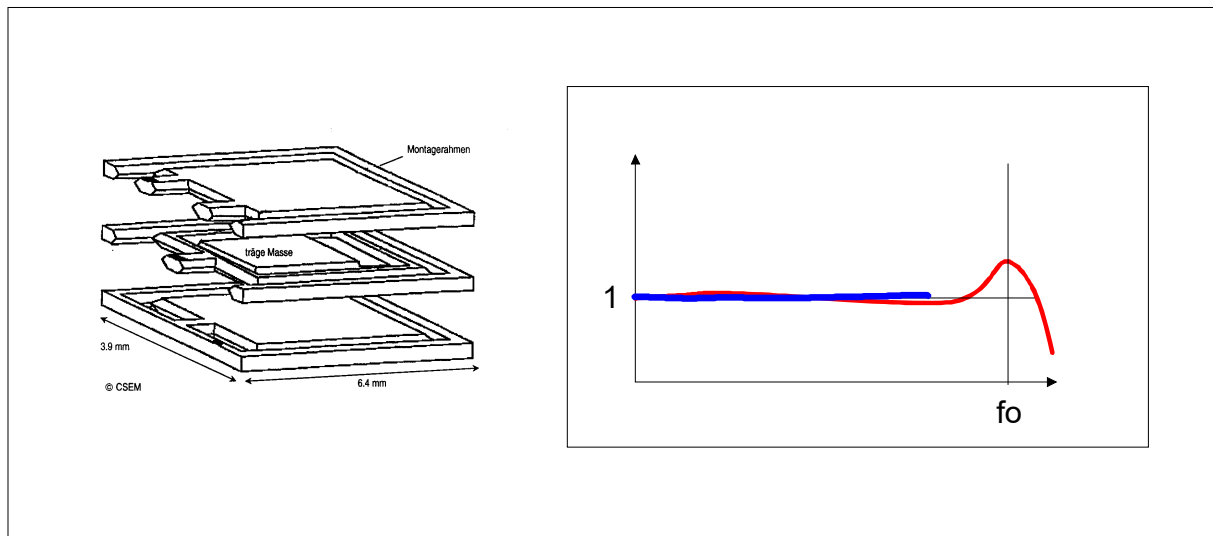
### 2.3 Kapazitive Messzelle

Geschwindigkeitsaufnehmer wie Geophon oder MEM sind Sensoren zur direkten Messung der Schwinggeschwindigkeit. Beschleunigungsaufnehmer hingegen messen nicht die Beschleunigung, sondern die Kraft, die sich bei der Beschleunigung ergibt. Dadurch ist der Beschleunigungsaufnehmer in der Lage Bewegungen mit bleibender Verschiebung aufzuzeichnen.

Als Beispiel für eine Beschleunigungsmesszelle wollen wir hier den kapazitiven Sensor heranziehen. Der kapazitive Sensor nutzt die Tatsache aus, dass die maximale Ladung zwischen zwei Kondensatorplatten umgekehrt proportional zum Abstand der Platten ist. Wird über einer starren Platte eine zweite elastisch gelagerte Platte befestigt, so verringert sich der Abstand zwischen den Platten proportional zur aufgebrachten Belastung bzw. zur wirkenden Beschleunigung. Durch dauerndes (hochfrequentes) Laden und Entladen des durch die zwei Platten gebildeten Kondensators, lässt sich die Kapazität und damit der Abstand und damit die wirkende Beschleunigung zu jedem Zeitpunkt bestimmen.

Bild 2.3 zeigt den mechanischen Aufbau der im Aufnehmer MS2002 verwendeten kapazitiven Messzelle. Zwischen zwei starren Plättchen von 4 mm x 6 mm ist ein elastisch gelagertes Plättchen eingebaut. Dieser „mechanische“ Teil ist hermetisch versiegelt und wird mit einer

mehr oder weniger komplexen Elektronik verbunden, die dafür sorgt, dass aus der Kapazitätsänderung ein der Beschleunigung proportionales Spannungssignal resultiert.



**Bild 2.3** Mechanischer Aufbau des kapazitiven Sensors (links); Response-Kurve unkorrigiert und korrigiert (rechts).

Ein interessanter Aspekt beim kapazitiven Sensor ist die Tatsache, dass die Eigenfrequenz nicht innerhalb des interessierenden Frequenzbereiches liegt und der Sensor somit nicht mit komplizierter Filterung linearisiert werden muss. Beim MS2002 zum Beispiel liegt die Eigenfrequenz bei 850 Hz, d.h. weit über dem Nutzbereich von 0 bis 315 Hz.

Da es sich beim kapazitiven Sensor letztlich um ein „Kraftmessung“ handelt, ist mit diesem Aufnehmer – im Gegensatz zum Geophon – eine Messung von Bewegungen mit bleibenden Verschiebungen möglich.

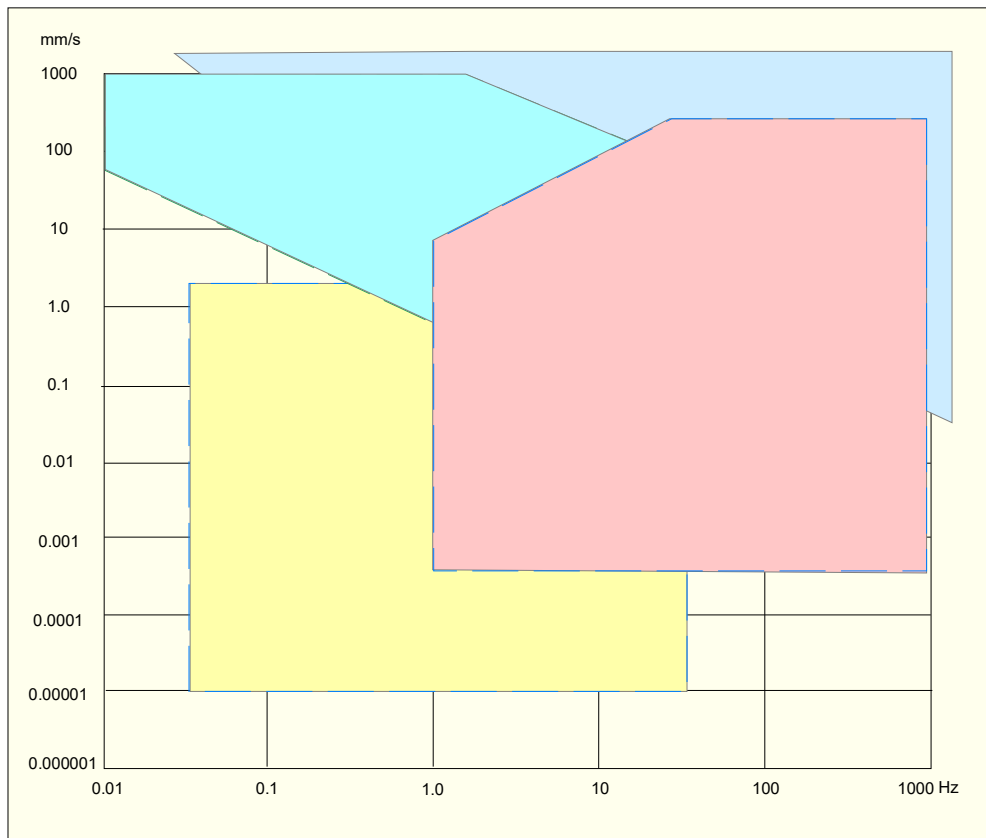
### 3 Sensoren für den MR2002

Das Erschütterungsmessgerät MR2002 wird standardmässig mit dem Sensor MS2002 (Beschleunigung) oder MS2003 (Geschwindigkeit) ausgerüstet. Für Spezialanwendungen sind jedoch weitere Sensoren erhältlich. In Tabelle 3.1 sind alle derzeit lieferbaren Sensoren und ihre Kennwerte zusammengestellt.

**Tabelle 3.1** Sensoren für den MR2002

Typ	Messgrösse	Messzelle	Amplitude	Frequenz
MS2002	Beschleunigung	Kapazitiv	0.2 mg bis 2 g	0 bis 315 Hz
MS2003	Geschwindigkeit	Geophon	0.0003 bis 230 mm/s	1 bis 600 Hz
MS2005	Beschleunigung	Piezo-elektrisch	50 mg bis 500 g	0.1 bis 1000 Hz
WB2000	Geschwindigkeit	MEM	0.00001 bis 3 mm/s	0.03 bis 30 Hz

Zur Veranschaulichung sind im Diagramm von Bild 3.1 die Messbereiche der verschiedenen Aufnehmer dargestellt.



- Messbereich Geschwindigkeitssensor MS2003:
- Messbereich Geschwindigkeitssensor WB2000:
- Messbereich Beschleunigungssensor MS2002:
- Messbereich Beschleunigungssensor MS2005:

**Bild 3.1** Messbereiche der verschiedenen Aufnehmer

## Vergleichsmessungen

Die technischen Daten eines Aufnehmers und die Kenntnisse über den Aufbau und die Funktionsweise erlauben es, abzuschätzen, für welche Anwendung welcher Sensor eingesetzt werden kann. Trotzdem bestehen in der Praxis oft Unsicherheiten über die effektive Eignung der verschiedenen Sensoren. Wir haben deshalb die verschiedenen für den MR2002 geeigneten Sensoren für einige typische Messaufgaben eingesetzt und die dabei erzielten Messergebnisse verglichen.

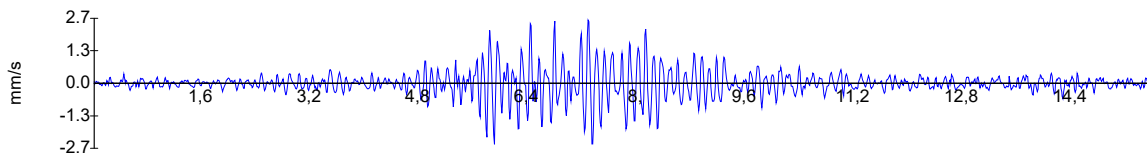
### 3.1 Eigenfrequenz einer Strassenbrücke

Als erstes Objekt wurde die in Bild 4.1a dargestellte Strassenbrücke (Duttweilerbrücke Zürich, maximale Spannweite 40 m) gewählt. Für diese Messungen wurden die Geschwindigkeitssensoren MS2003 und WB2000 sowie der Beschleunigungssensor MS2002 eingesetzt (Bild 4.1b).

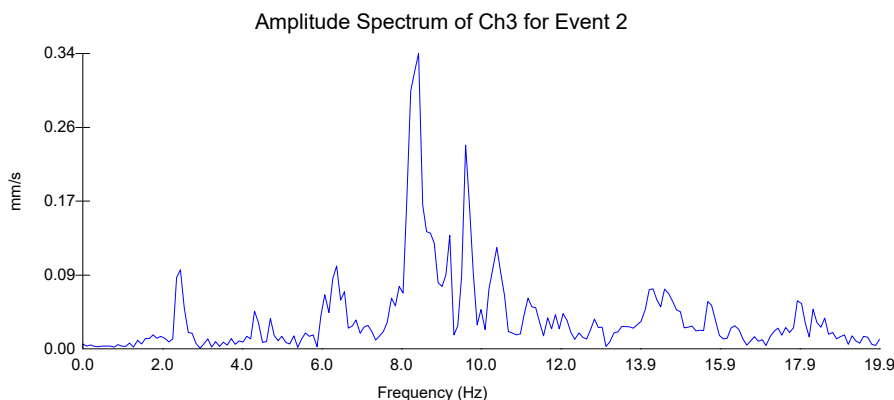


**Bild 4.1a,b** Erschütterungsmessungen für eine Strassenbrücke; *rechts*: MR2002 mit den Sensoren MS2003, WB2000 und MS2002.

Bild 4.2 zeigt die Messung mit dem MS2003. Die durch einen Lastwagen hervorgerufene Erschütterung von maximal 2.6 mm/s lässt sich erwartungsgemäss sehr gut messen. Auch die Frequenzanalyse in Bild 4.3 zeigt sehr deutlich die verschiedenen Grundfrequenzen.

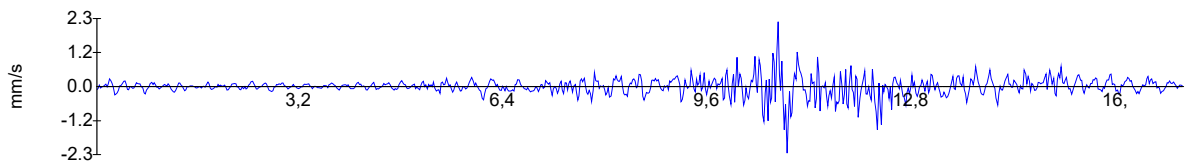


**Bild 4.2** Messung der Schwinggeschwindigkeit mit MS2003

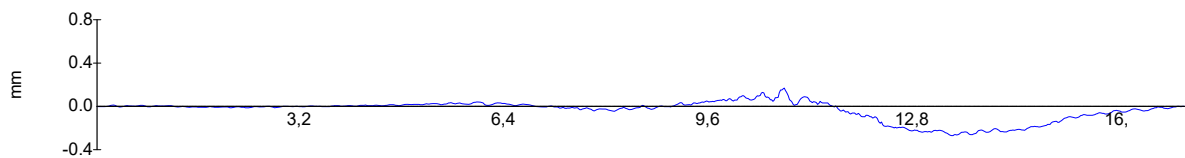


**Bild 4.3** Amplituden-Spektrum von Bild 4.2

Bild 4.4 zeigt die Messung mit dem Sensor WB2002. Da es sich nicht um den gleichen Lastwagen wie in Bild 4.2 handelt, weicht die maximale Schwinggeschwindigkeit etwas von der Messung mit dem MS2003 ab. Bild 4.5 zeigt die durch Integration des Signals von Bild 4.4 berechnete Einsenkung der Brücke. Ob diese Wegamplituden zuverlässig sind, muss durch weitere Versuche noch geprüft werden.

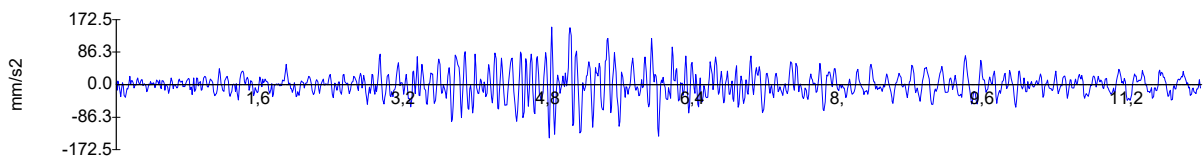


**Bild 4.4** Messung der Schwinggeschwindigkeit mit WB2000

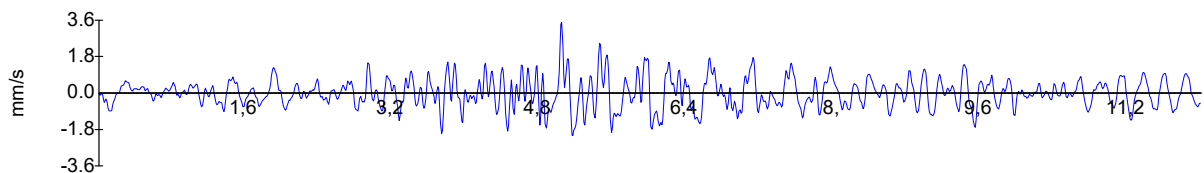


**Bild 4.5** Wegamplitude durch Integration des Signals von Bild 4.4

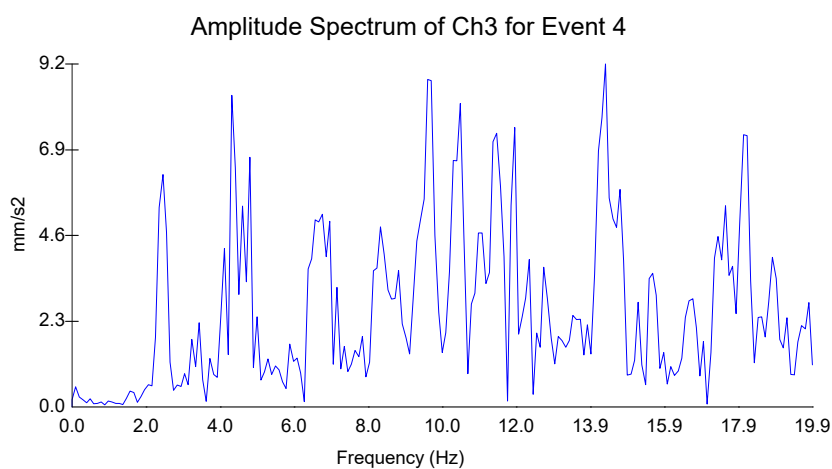
Bild 4.6 zeigt die Messung mit dem Beschleunigungssensor MS2002. Durch Integration erhalten wir ein  $v_{\max}$  von 3.6 mm/s, was mit der Messung in Bild 4.2 gut übereinstimmt. Die Frequenzanalyse in Bild 4.8 zeigt allerdings, dass mit dem Geschwindigkeitssensor eine wesentlich bessere Frequenzbestimmung im interessierenden Frequenzbereich (2 bis 10 Hz) möglich ist.



**Bild 4.6** Messung mit MS2002;  $a_{\max} = 170 \text{ mm/s}^2$



**Bild 4.7** Schwinggeschwindigkeit durch Integration des Signals von Bild 4.6;  $v_{\max} = 3.6 \text{ mm/s}$



**Bild 4.8** Amplituden-Spektrum für Signal von Bild 4.7



### 3.2 Eigenfrequenzbestimmung bei Staudämmen

Oft taucht die Frage auf, ob die Eigenfrequenz von Staudämmen allein durch Messung der Hintergrundschrüttungen (ambient vibration) bestimmt werden kann. Für die beiden Staudämme Emossen im Wallis und Contra im Tessin haben wir deshalb einige einfache Messungen durchgeführt.

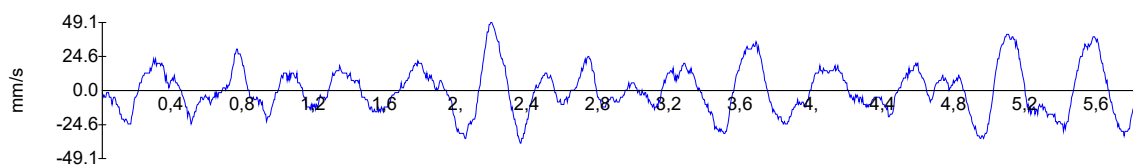


**Bild 4.9** Staudamm Emossen

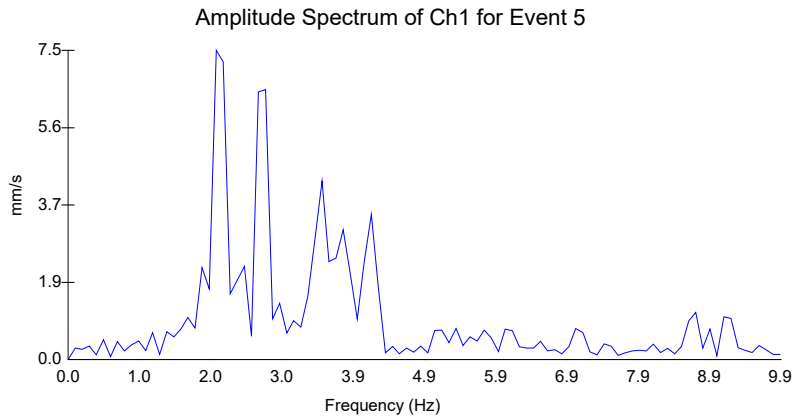


**Bild 4.10** Staudamm Contra

Bild 4.11 zeigt die Messung mit dem Geschwindigkeitssensor MS2003 auf dem Staudamm Emosson. Die durch einen relativ schwachen Wind erzeugte Schwingung lässt sich offensichtlich gut messen. Sie erreicht eine maximale Schwinggeschwindigkeit von  $49 \mu\text{m/s}$ . Die Frequenzanalyse zeigt sehr deutlich die Grundfrequenz von  $2.2 \text{ Hz}$ . (Hinweis: Die Einheiten in den Diagrammen für die Staudämme sind nicht korrekt:  $\text{mm/s}$  bedeutet  $\mu\text{m/s}$ )

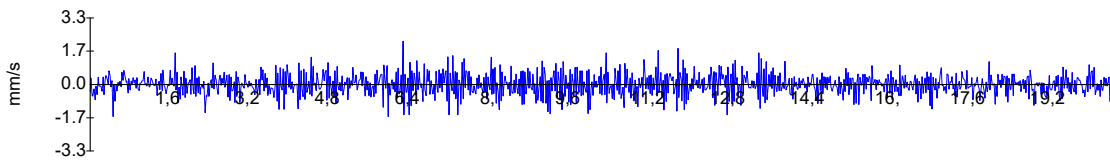


**Bild 4.11** Messung Staudamm Emossen mit MS2003  $v_{\text{max}} = 49 \mu\text{m/s}$

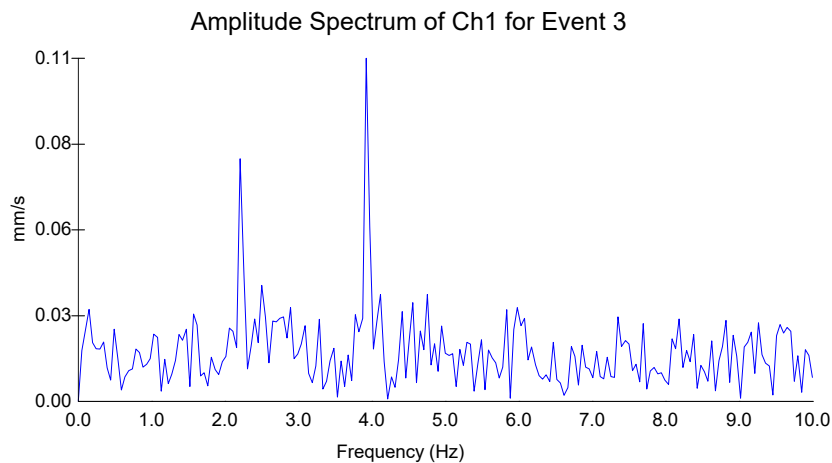


**Bild 4.12** Amplitudenspektrum von Signal in Bild 4.11

Bei der Messung mit dem MS2003 auf dem Staudamm Contra (Bild 4.13) war die Grundschwingung im Signalverlauf nicht mehr deutlich zu erkennen, da hier die Hintergrundschwingung wesentlich geringer war ( $v_{\max} = 2.2 \mu\text{m/s}$ ). Trotzdem liess sich die Eigenfrequenz mittels Frequenzanalyse sehr gut bestimmen (vgl. Bild .14).

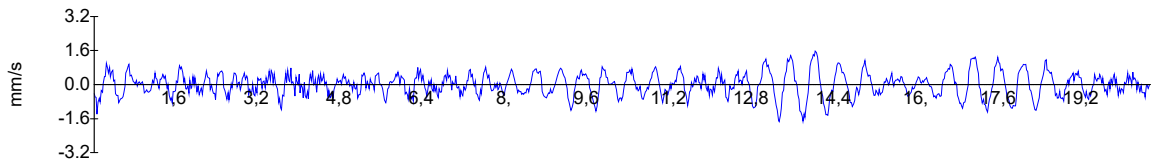


**Bild 4.13** Messung Staudam Contra mit MS2003;  $v_{\max} = 2.2 \mu\text{m/s}$

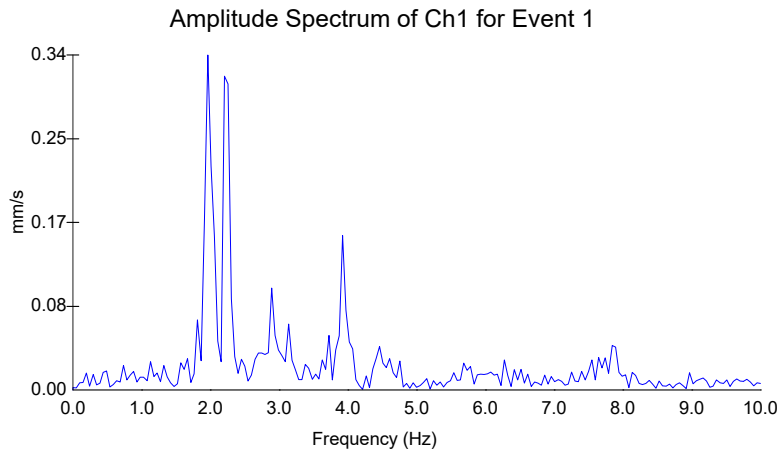


**Bild 4.14** Amplitudenspektrum von Signal in Bild 4.13

Bessere Aufzeichnungen lieferte hier die Messung mit dem Geschwindigkeitssensor WB2000 mit der Molekular-Elektronischen Messzelle. Dank der höheren Empfindlichkeit und der Filterung der höheren Frequenzen ist die Grundschwingung des Dammes im Signal deutlich erkennbar. Die maximale Schwinggeschwindigkeit und das Amplitudenspektrum stimmen sehr gut mit den Messungen mit dem MS2003 überein.



**Bild 4.15** Messung Staudam Contra mit WB2000;  $v_{\max} = 1.8 \mu\text{m/s}$



**Bild 4.16** Amplitudenspektrum von Signal in Bild 4.15

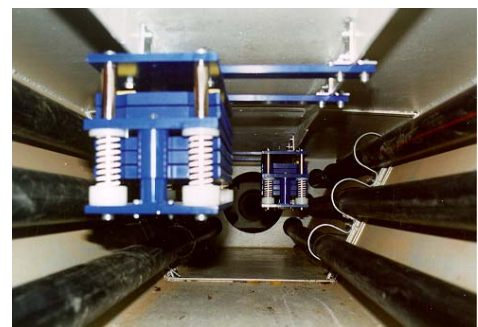
Mit dem Beschleunigungssensor MS2002 konnten hier erwartungsgemäss keine sinnvollen Messungen durchgeführt werden.

### 3.3 Schwingungen einer Fussgängerbrücke

Schlanke Fussgängerbrücken neigen oft zu übermässigen Schwingungen, die zwar nicht für die Brücke selbst, aber für die Passanten unangenehm sein können. Bei der in Bild 4.17 dargestellten Fussgängerbrücke wurden – für die Dimensionierung der Tilger – Schwingungsmessungen mit dem MR2002 durchgeführt.

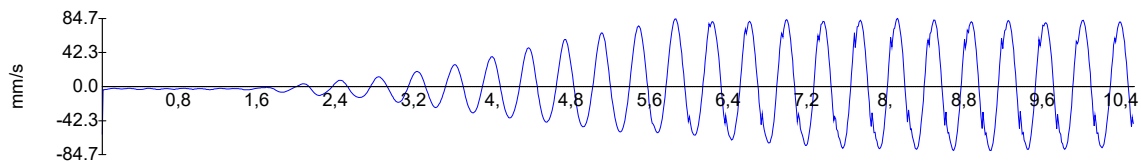


**Bild 4.17** Hardeggsteg, Zürich

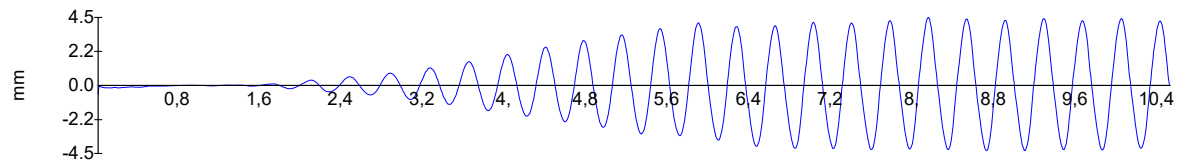


**Bild 4.18** Schwingungstilger

Die ersten Messungen wurden mit dem Schwinggeschwindigkeitssensor MS2003 durchgeführt und ergaben, wie man in Bild 4.19 sieht, ein  $v_{\max}$  von 84.6 mm/s. Eine genaue Betrachtung des Signals zeigt allerdings, dass der Sensor ausserhalb des zulässigen Bereichs verwendet wurde. Die schwingende Masse im Sensor ist am Endanschlag angestossen und hat zu einer Verfälschung des Signals geführt. Die Berechnung der Wegamplitude in Bild 4.20 ergab dann auch ein  $d_{\max}$  von 4 mm, eine Auslenkung für die der Sensor nicht gebaut ist.

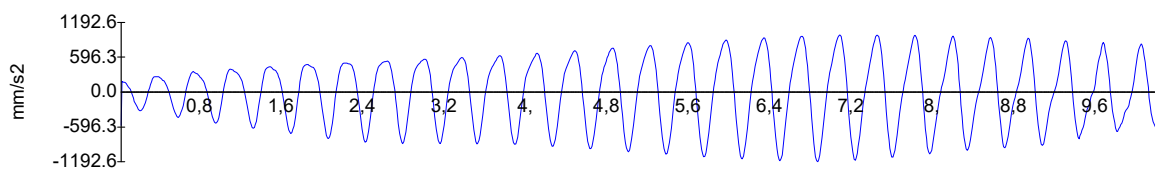


**Bild 4.19** Messungen Hardeggsteg mit MS2003;  $v_{\max} = 84.6 \text{ mm/s}$

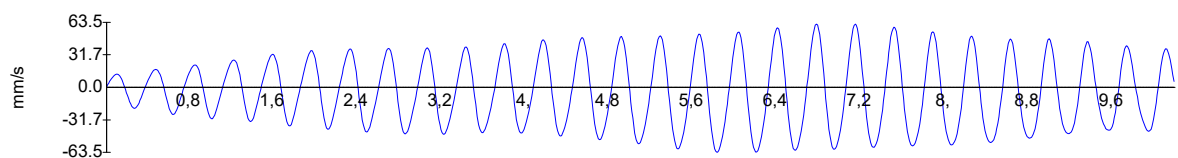


**Bild 4.20** Durch Integration des Signals in Bild 4.19 ermittelte Wegamplitude

Eine Wiederholung der Messung mit dem Beschleunigungssensor MS2002 ergab die Aufzeichnung in Bild 4.21 und eine maximale Schwinggeschwindigkeit von 63 mm/s (vgl. Bild 4.22).



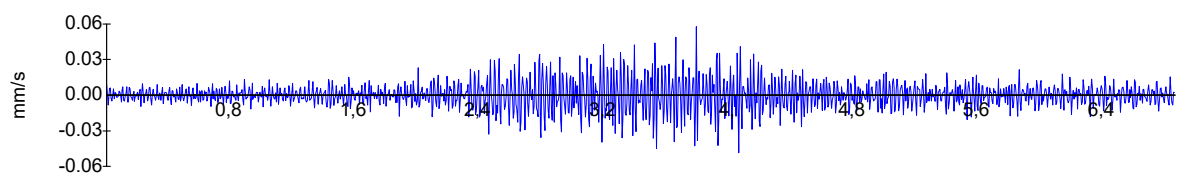
**Bild 4.21** Messungen Hardeggsteg mit MS2002;  $a_{\max} = 1193 \text{ mm/s}^2$



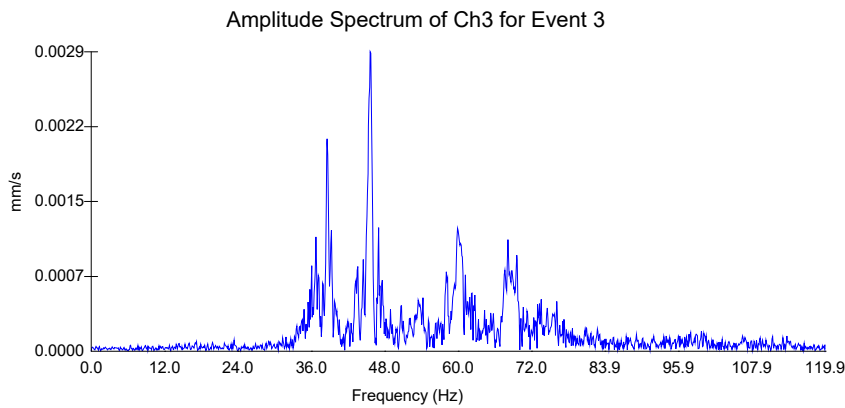
**Bild 4.22** Durch Integration des Signals in Bild 4.21 ermittelte Schwinggeschwindigkeit;  $v_{\max} = 63 \text{ mm/s}$

### 3.4 Vibrationen infolge Eisenbahnverkehr

Erschütterungsmessungen wegen Zugserschütterungen sind eine immer wiederkehrende Aufgabe. Für die vorliegende Vergleichsstudie wurde ein Gebäude direkt über einem Eisenbahntunnel gewählt. Die Tunnelüberdeckung beträgt ca. 20 m. Bild 4.23 zeigt die mit dem Geschwindigkeitssensor MS2003 aufgezeichneten Erschütterungen während einer Zugs vorbeifahrt. Die Erschütterungen sind, wie man aus der Aufzeichnung entnehmen kann, zwar nicht spürbar, doch sie verursachen Körperschall. In der Frequenzanalyse in Bild 4.24 sind die für Zugsimmissionen typischen Hauptfrequenzen zwischen 30 und 80 Hz sehr schön zu sehen.

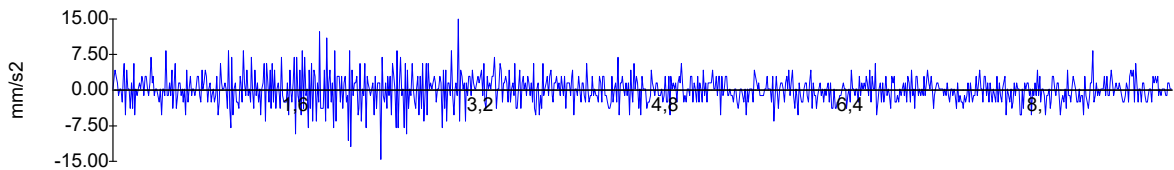


**Bild 4.23** Messung der vom Zug induzierten Erschütterungen mit MS2003;  $v_{\max} = 0.053 \text{ mm/s}$

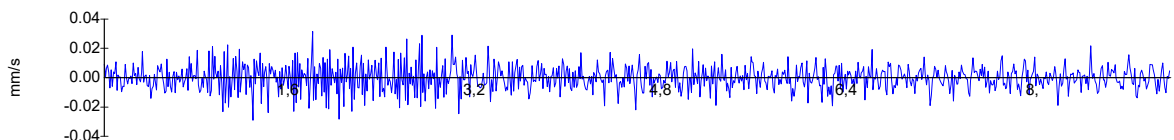


**Bild 4.24** Amplitudenspektrum von Signal in Bild 4.23

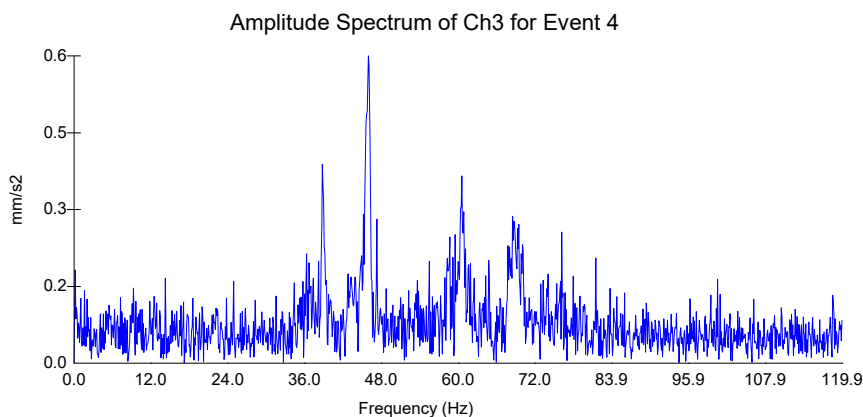
Zum Vergleich wurde die gleiche Zugsdurchfahrt mit dem Beschleunigungssensor MS2002 aufgezeichnet, wobei das Zeitfenster allerdings leicht verschoben war. Bild 4.25 zeigt die Aufzeichnung mit dem MS2002 und Bild 4.26 das aus dieser Aufzeichnung durch Integration gewonnene Geschwindigkeitssignal. Die maximalen Schwinggeschwindigkeiten stimmen zwar sehr gut überein, doch weist das mit dem Beschleunigungssensor ermittelte Signal einen recht grossen Rauschanteil auf. Auch der Vergleich der Amplitudenspektren zeigt, dass die Bestimmung der Hauptfrequenzen mit beiden Messmethoden möglich ist, dass aber die Messung mit dem Geschwindigkeitssensor eine wesentlich klareren Frequenzdarstellung erlaubt.



**Bild 4.25** Messung der Zugserschütterungen mit dem MS2002;  $a_{\max} = 15 \text{ mm/s}^2$



**Bild 4.26** Durch Integration ermittelte Schwinggeschwindigkeit;  $v_{\max} = 0.044 \text{ mm/s}$



**Bild 4.27** Amplitudenspektrum von Signal in Bild 4.25



### 3.5 Schwingungen eines Turmes

Hohe Aussichtstürme haben oft Eigenfrequenzen unterhalb 1 Hz und zum Teil recht hohe Auslenkungen. Schwingungsgeschwindigkeitssensoren mit ihren nach unten begrenzten Frequenzbereichen und ihrer bauartbedingten Beschränkung des Schwingweges sind nicht ohne weiteres für solche Messungen geeignet. Beschleunigungssensoren hingegen erlauben zwar Messungen von sehr tiefen Frequenzen, doch sind sie wegen der bei tiefen Frequenzen zumeist recht geringen Beschleunigungskräfte nicht geeignet.

Messungen auf dem Eiffelturm mit dem Geschwindigkeitssensor MS2003 haben gezeigt, dass sich mit diesem Sensor sogar Eigenfrequenzen von 0.3 Hz messen lassen. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Antwort des Sensors unterhalb von 1 Hz nicht mehr linear ist und deshalb entsprechend korrigiert werden muss.

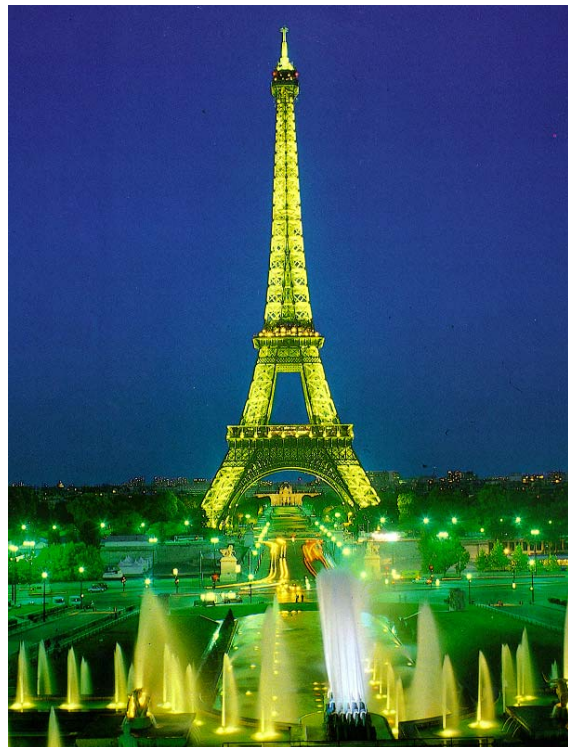
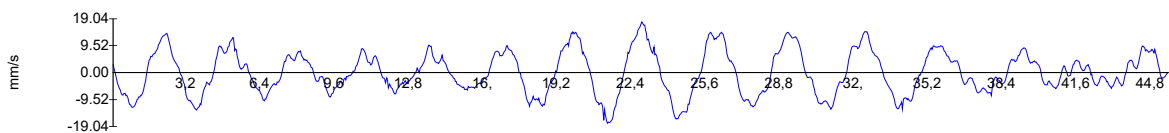
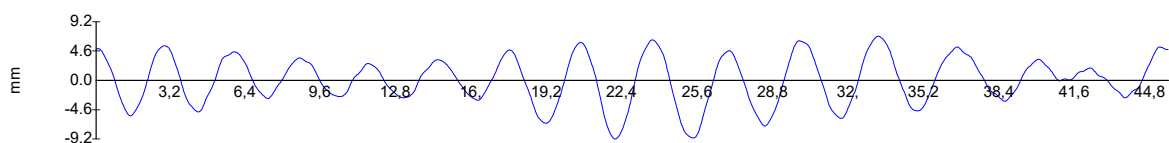


Bild 4.28 zeigt die Horizontalschwingung der obersten Plattform des Eiffelturms. Die maximale Schwingungsgeschwindigkeit beträgt 19 mm/s. Durch Integration wurde eine maximale Auslenkung von 9.2 mm ermittelt (vgl. Bild 4.29). Die Eigenfrequenz beträgt 0.3 Hz.



**Bild 4.28** Messung der Horizontalschwingung des Eiffelturms mit dem MS2003;  $v_{\max} = 19$  mm/s.



**Bild 4.29** Durch Integration ermittelte Wegamplitude;  $d_{\max} = 9.2$  mm

## 4 Zusammenfassung

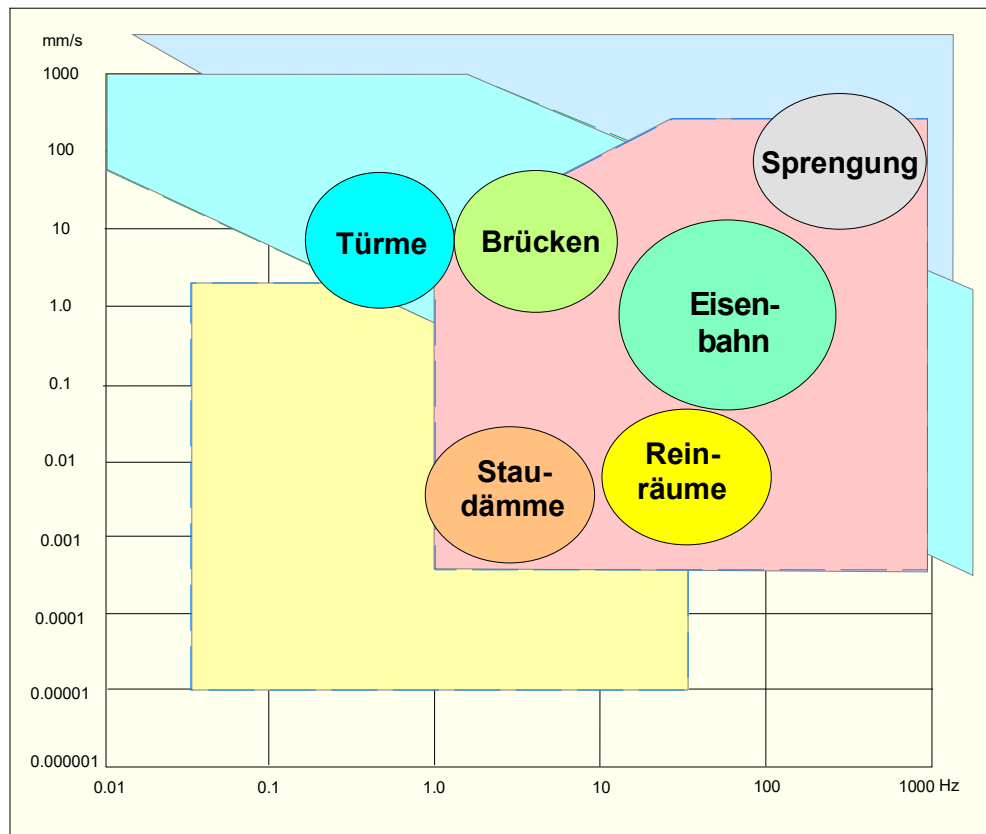
Zum Abschluss soll eine vergleichende Darstellung der Messbereiche der verschiedenen Sensoren für den MR2002, zusammen mit den typischen Anwendungen in der Bauwerksdynamik, aufzeigen, welche Sensoren für welche Anwendungen am ehesten geeignet sind. Bild 5.1 zeigt sehr schön, dass der Standardsensor, d.h. der Geschwindigkeitssensor MR2002 für die meisten Anwendungen sehr gut geeignet ist. Sogar für die Eigenfrequenzbestimmung von Aussichtstürmen lässt sich der MS2003, wie das Beispiel mit dem Eiffelturm gezeigt hat, ohne weiteres einsetzen.

Trotzdem darf man die Beschränkungen des Geschwindigkeitssensors MS2003 nicht ausser acht lassen. Alle Anwendungen in Bild 5.1, die sich im Randbereich des roten Feldes befinden, sind für den MS2003 möglicherweise kritische Fälle und müssen durch Testmessungen

sorgfältig geprüft werden. Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Messungen zeigen, dass der MR2003 für folgende Fälle ungeeignet ist:

- Erschütterungsmessung für Brücken mit sehr tiefen Frequenzen und gleichzeitig sehr hohen Wegamplituden
- Eigenfrequenzbestimmung für Staudämme bei sehr geringen Hintergrunderschütterungen (wenig Wind; sehr steife Konstruktion)
- Erschütterungsmessungen in nächster Nähe des Sprengortes

Für alle diese Spezialfälle stehen jedoch alternative Sensoren zur Verfügung.



Messbereich Geschwindigkeitssensor MS2003:	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #f08080; border: 1px solid black;"></span>
Messbereich Geschwindigkeitssensor WB2000:	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #ffff00; border: 1px solid black;"></span>
Messbereich Beschleunigungssensor MS2002:	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #add8e6; border: 1px solid black;"></span>
Messbereich Beschleunigungssensor MS2005:	<span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #add8e6; border: 1px solid black;"></span>

**Bild 5.1** Darstellung der Messbereiche der verschiedenen Sensoren zusammen mit den typischen Anwendungen in der Bauwerksdynamik