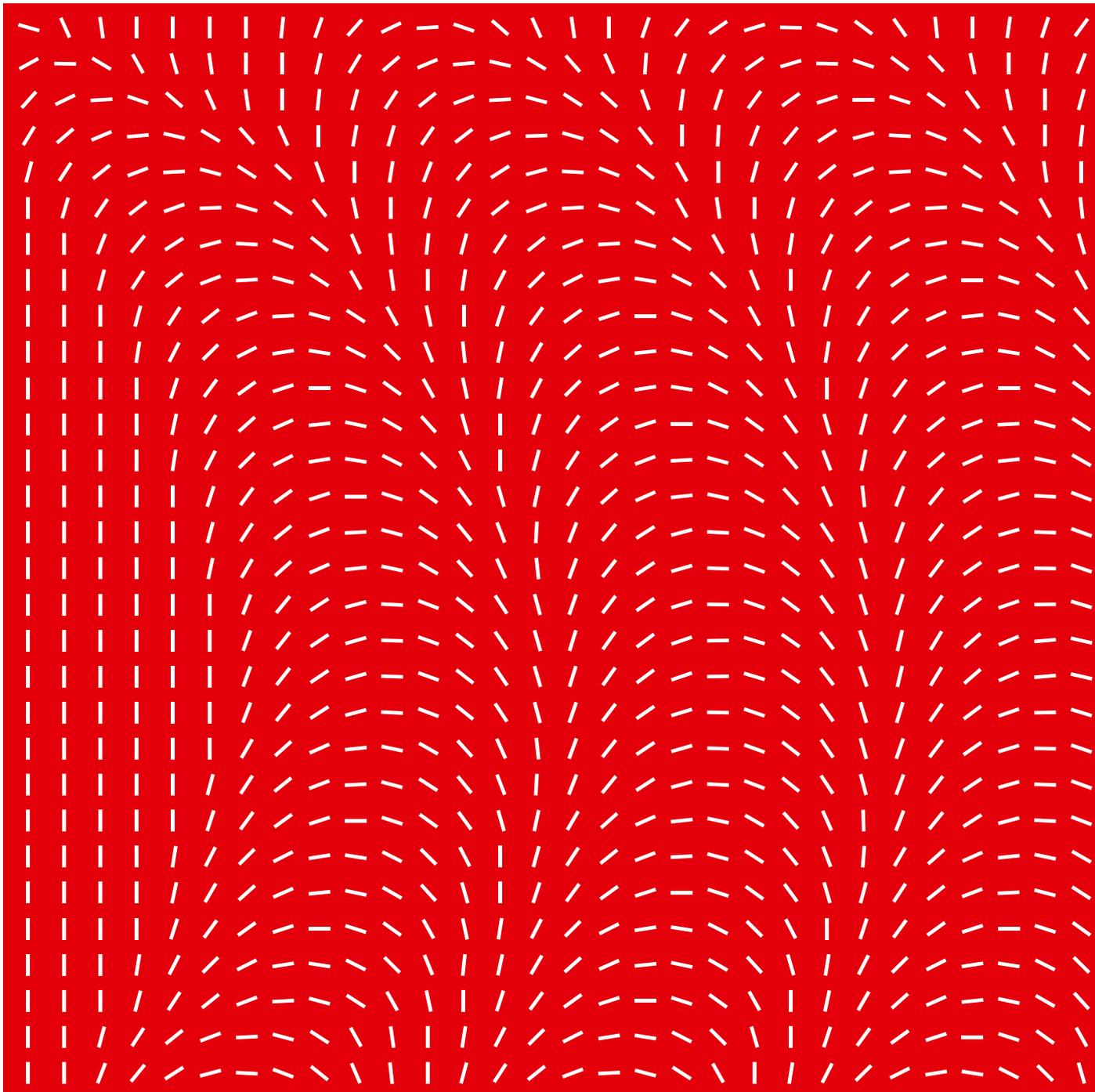


## Erschütterungsüberwachung bei Bauarbeiten



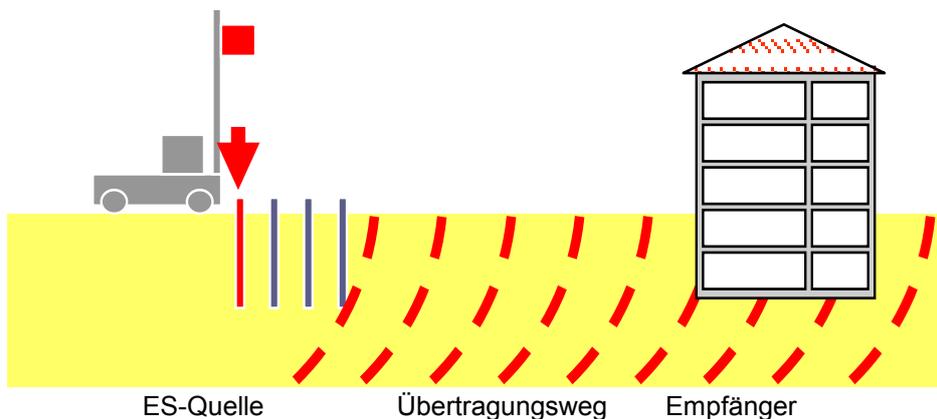
# Erschütterungsüberwachung bei Bauarbeiten

A. Ziegler, Dr. sc. techn., ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich

## 1 Einleitung

Die Problematik der Erschütterungseinwirkung auf Nachbarbauten bei Bauarbeiten hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung zugenommen. Es gibt kaum ein grösseres Bauvorhaben in dicht besiedeltem Gebiet, das ohne Erschütterungsüberwachung ausgeführt werden kann. Dies hängt einerseits mit den immer grösseren und schwereren Baumaschinen zusammen, andererseits aber auch mit der generellen Überlastung der Menschen durch störende Immissionen.

Im vorliegend Beitrag soll diese Problematik näher beleuchtet werden. Im ersten Kapitel werden die dabei involvierten Akteure, d.h. die Erschütterungsquellen, das Übertragungsmedium und die Erschütterungsempfänger beschrieben (vgl. Abb. 1.1). Anschliessend werden die wichtigsten Grundlagen für die Messung von Erschütterungen besprochen. Der Hauptteil des Beitrages befasst sich mit der Wirkung von Erschütterungen auf die verschiedenen Empfänger, d.h. auf Menschen, Bauwerke und Anlagen. Dabei werden auch die für die Schweiz geltenden Normen und Immissionsrichtwerte beschrieben. Im letzten Kapitel schliesslich werden die Anforderungen an eine geeignete Erschütterungsüberwachung zusammengestellt.



**Abb. 1.1:** Erschütterungsquelle, Übertragungsweg und Empfänger

## 2 Von der Quelle zum Empfänger

### 2.1 ES-Quellen

Die wichtigsten Erschütterungsquellen bei Bauarbeiten sind:

- Vibrationsrammen
- Fallgewichte (Pfähle)
- Abbruch- / Rückbau-Arbeiten
- Verdichtungswalzen
- Abbauhämmer
- Gleisschlag
- Sprengen



**Abb. 2.1a:** Vibrationsramme

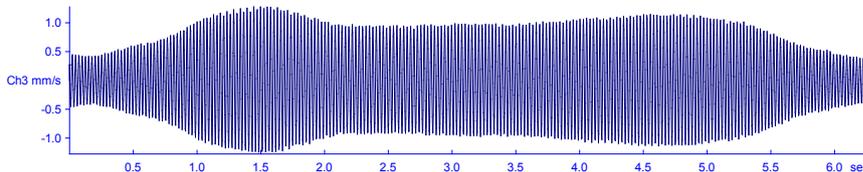


**Abb. 2.1b:** Rammen von Pfählen

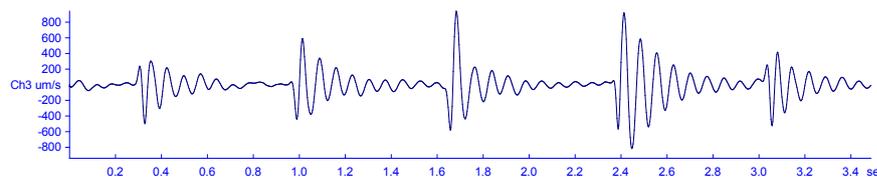


**Abb. 2.1c:** Gleisschlag

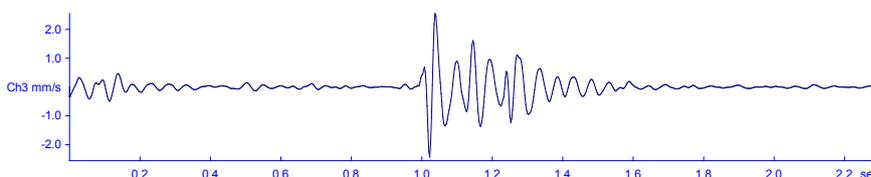
Diese Erschütterungsquellen unterscheiden sich, neben der Stärke der Anregung, vor allem im zeitlichen Verlauf. Wir können unterscheiden zwischen „Harmonischer Anregung“, „Zyklischer Anregung“ und „Einzelimpulsen“. Vibrationsrammen und Verdichtungswalzen erzeugen eine harmonische Anregung, was bei Nachbarbauten zu Resonanzerscheinungen führen kann. Fallgewichte und Abbauhämmer verursachen zyklische Impulsbelastungen, die jedoch kaum Resonanzschwingungen erzeugen, da die Schwingung abklingt, bevor der nächste Schlag erfolgt. Abbruch-Arbeiten und Sprengungen schliesslich erzeugen Einzelererschütterungen von relativ kurzer Dauer.



**Abb. 2.2a:** Harmonische Anregung beim Einvibrieren von Spundwänden



**Abb. 2.2b:** Zyklische Anregung beim Rammen von Pfählen



**Abb. 2.2c:** Kurzzeitige Anregung beim Herausreissen von Gleisen

In der Regel lässt sich die Stärke der Erschütterungsanregung bei Baumaschinen nur sehr beschränkt steuern. Ein Sonderfall stellt die Vibrationsramme dar: Ältere Modelle durchlaufen den gesamten Frequenzbereich von 0 bis 40 Hz und erzeugen dadurch stets im Bereich von ca. 25 Hz starke Resonanzschwingungen mit sehr hohen Schwingungsamplituden. Neuere Modelle schalten die Vibration erst nach Erreichen der Arbeitsfrequenz ein und vermeiden damit die stärksten Erschütterungen.

## 2.2 ES-Empfänger

Als Erschütterungsempfänger sind in der Regel Menschen, Bauwerke und empfindliche Anlagen im Nahbereich der Baustelle zu berücksichtigen. Die Wirkung auf Menschen besteht primär in einer Belästigung. Diese kann von einer Ruhestörung bis zum Erschrecken reichen. Bei kurzen Bauzeiten (wenige Tage) wird von den Nachbarn einer Baustelle relativ viel toleriert. Bei längeren Bauzeiten (mehrere Wochen) sollten die Immissionen möglichst klein gehalten werden.

Bauwerke reagieren in der Regel wesentlich weniger empfindlich auf Erschütterungen als Menschen. Allerdings können die verursachten Schäden sehr teuer und oft irreparabel sein. Die Wirkung beschränkt sich dabei nicht nur auf die Rissbildung durch dynamische Überbeanspruchung, d.h. kurzzeitiges Überschreiten der Zug- oder Schubfestigkeit. Erschütterungen können durch Verdichtung des Bodens Setzungen auslösen, die ebenfalls zu Rissbildung führen.

Besondere Beachtung erfordern empfindliche Anlagen im Umfeld der Erschütterungsquelle. Früher galten Rechenzentren mit ihren Disk-Stationen als besonders empfindlich. Moderne Computeranlagen ertragen relativ viel an Erschütterungen. Es sind vielmehr Anlagen für Präzisionsfertigung (Oberflächenbearbeitung, lithographische Wafer-Herstellung u.ä.), die bereits bei Erschütterungen, die von Menschen kaum wahrgenommen werden, nicht mehr einwandfrei arbeiten können. Für solche Anlagen sind vorgängig Angaben zur Erschütterungsempfindlichkeit einzuholen.

Kulturgüter im Umfeld der Baustelle verdienen ebenfalls besondere Beachtung. Kirchen, Museen aber auch schützenswerte Bauten und alte Industrieanlagen (als Zeugen vergangener Zeitepochen) sind in die Erschütterungsüberwachung einzubeziehen.



**Abb. 2.3a:** Rammen von Pfählen neben einem Wohnblock



**Abb. 2.3b:** Erschütterungsüberwachung in einem Computerzentrum



**Abb. 2.3c:** Erschütterungsüberwachung in einem Museum

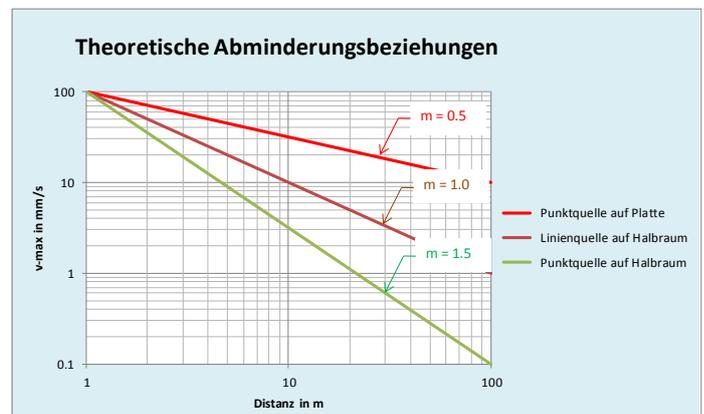
## 2.3 Übertragungsweg

Die Übertragung der Erschütterung von der Quelle zum Empfänger erfolgt entweder über den Baugrund oder – falls die Baumassnahme im zu schützenden Gebäude selbst stattfindet - über Bauteile. Bei einer Übertragung über den Baugrund liesse sich die Abminderung nach der Theorie des elastischen Halbraumes berechnen.

Die Abminderung lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^n$$

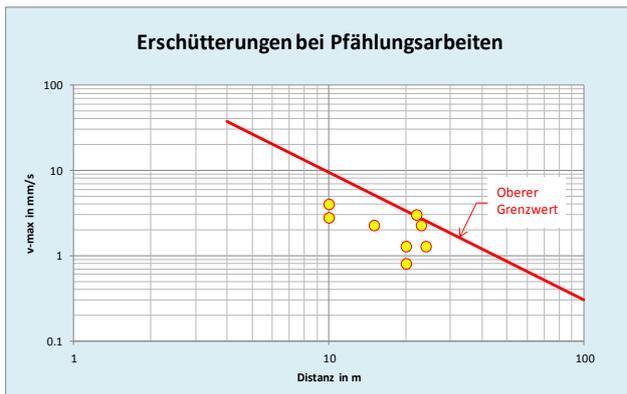
mit  $v$  = Schwinggeschwindigkeit in einer Distanz  $r$ ,  $v_0$  = Schwinggeschwindigkeit in einer Distanz  $r_0$  und  $n$  = Abminderungsexponent. Für die Ausbreitung im elastischen Halbraum bei Anregung mit einer Punktquelle gilt ein Exponent von  $n = 1.5$ , bei einer Linienquelle gilt  $n = 1.0$ . Für die Ausbreitung in einer Platte gilt bei einer Punktquelle  $n = 0.5$ .



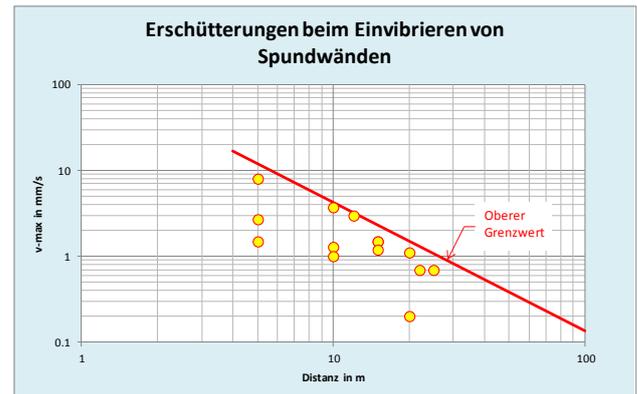
**Abb. 2.4:** Theoretische Abminderungsbeziehungen

In der Praxis wird man, da bereits die Stärke der Anregung zu wenig genau bekannt ist, auf eine Ausbreitungsrechnung verzichten und eher auf Versuche (Rammversuche, Test-Sprengungen) abstützen. Zumeist ist es auch möglich, mit den Bauarbeiten in einem entfernt gelegenen Bereich zu beginnen und so die Zunahme der Erschütterungen mit abnehmender Distanz zu messen. Bei einer Übertragung über Bauteile ist eine Berechnung der Erschütterungen ohnehin nicht möglich. Bei Arbeiten in unmittelbarer Nähe des zu schützenden Objektes kann sogar eine zeitweilige Begleitung der Arbeiten durch den Erschütterungsfachmann vor Ort erforderlich sein.

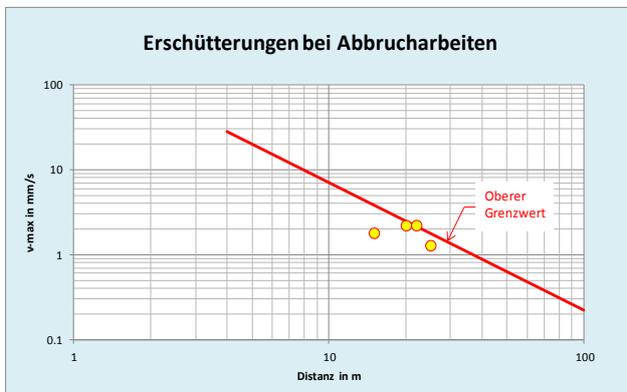
Abb. 2.5a bis d zeigen – als grobe Orientierungshilfe – empirisch bestimmte Abminderungskurven für das Rammen von Pfählen, für das Einvibrieren von Spundwänden, für Abbruch- und für Sprengarbeiten. Die roten Linien stellen – ausser in Abb. 2.5d – einen oberen Grenzwert dar.



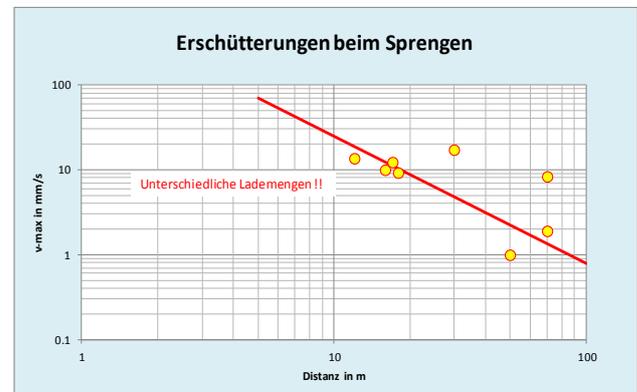
**Abb. 2.5a:** Abminderungskurven für Rammen von Pfählen ( $v_{max}$  gemessen auf Gebäudefundament)



**Abb. 2.5b:** Abminderungskurven für Einvibrieren von Spundwänden ( $v_{max}$  gemessen auf Gebäudefundament)



**Abb. 2.5c:** Abminderungskurven für Abbrucharbeiten ( $v_{max}$  gemessen auf Gebäudefundament)



**Abb. 2.5d:** Abminderungskurven für Sprengungen ( $v_{max}$  gemessen auf Gebäudefundament)

Mit diesen Diagrammen lässt sich u.a. herleiten, bis zu welcher Distanz Erschütterungsüberwachungen erforderlich sind. Will man alle Gebäude überwachen, bei denen die Erschütterungen auf dem Gebäudefundament einen Wert von 2 mm/s überschreiten könnten, so sind folgende Distanz einzuhalten:

- Für Rammen von Pfählen: 30 m
- Für Vibrieren von Spundwänden: 20 m
- Für Abbrucharbeiten: 25 m
- Für Sprengarbeiten: 50 bis 100 m (je nach Lademenge!)

### 3 Messung von ES-Immissionen

Bei der Messung von Erschütterungsimmisionen stehen drei Fragen im Zentrum: Mit welcher physikalischen Grösse sollen wir die Erschütterung darstellen, wo soll die Erschütterung gemessen werden und welcher Messbereich muss uns zur Verfügung stehen, um die Erschütterung adäquat zu erfassen. Im Folgenden sollen diese drei Fragen näher erörtert werden.

#### 3.1 Messgrössen

Bei der messtechnischen Erfassung von mechanischen Schwingungen geht es grundsätzlich um die Aufzeichnung von Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- oder Weg-Zeit-Verläufen. Bevor wir jedoch auf die Messung selbst eingehen, wollen wir die Zusammenhänge zwischen diesen drei Grössen kurz rekapitulieren.

Ein Fahrzeug, das sich während 2 Sekunden mit einer konstanten Beschleunigung von  $10 \text{ m/s}^2$  bewegt, weist einen Beschleunigungs-Zeit-Verlauf auf, wie er in Abb. 3.1a dargestellt ist. Aus diesem Zeitverlauf können wir die Geschwindigkeit z. B. zum Zeitpunkt 1 s berechnen, indem wir die Fläche des blauen Rechtecks bestimmen, d.h.  $v_{(t=1s)} = 10 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ s} = 10 \text{ m/s}$ . Die so berechnete Geschwindigkeit ergibt den Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf in Abb. 3.1b (blaue Linie). Ausgehend von der Geschwindigkeit können wir in analoger Weise den Weg-Zeit-Verlauf berechnen, in dem wir – z.B. für den Zeitpunkt 1 s – die Fläche des grünen Dreiecks bestimmen, d.h.  $d_{(t=1s)} = 10 \text{ m/s} \cdot 1 \text{ s} \cdot \frac{1}{2} = 5 \text{ m}$ . Der so berechnete Weg ergibt den Weg-Zeit-Verlauf in Abb. 3.1c (grüne Linie).

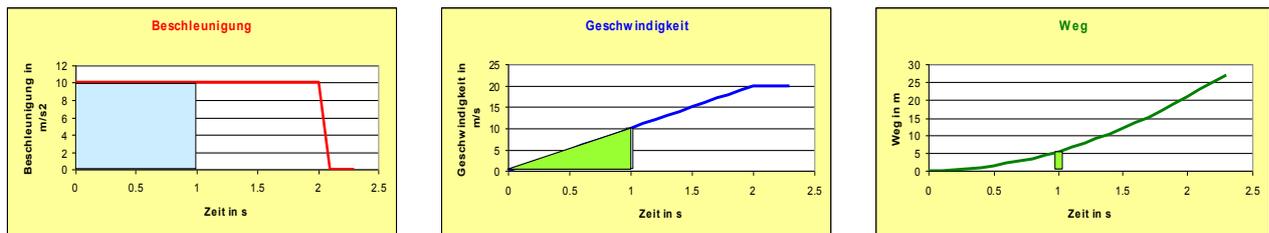


Abb 3.1a,b,und c: Zeitlicher Verlauf von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg für eine Bewegung mit konstante Beschleunigung

Umgekehrt lässt sich aus dem Weg die Geschwindigkeit und aus der Geschwindigkeit die Beschleunigung bestimmen. Die Steigung des Weg-Zeit-Verlaufs entspricht der Geschwindigkeit und die Steigung des Geschwindigkeits-Zeit-Verlaufs der Beschleunigung. Mathematisch lassen sich diese Zusammenhänge wie folgt darstellen:

$$v(t) = \int_0^t a \cdot dt + C \qquad d(t) = \int_0^t v \cdot dt + C \qquad a(t) = \frac{d}{dt} v(t) \qquad v(t) = \frac{d}{dt} d(t)$$

Das gleiche Verfahren lässt sich natürlich auch für Schwingungen anwenden. Abb. 3.2a zeigt eine harmonische Schwingung mit einer Periode von  $T = 2.2 \text{ s}$  (Dauer einer Schwingung).

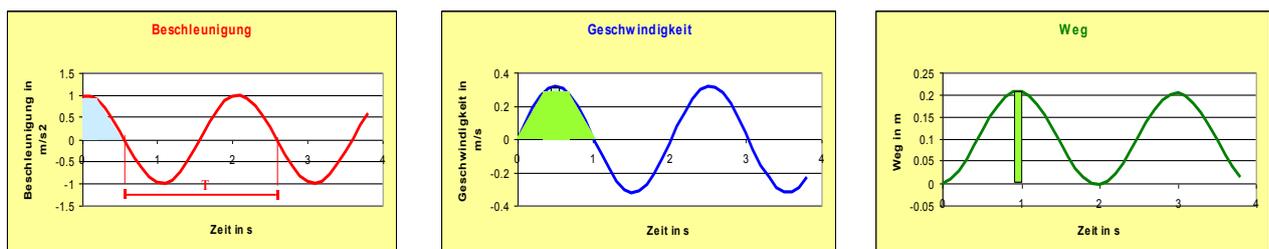


Abb. 3.2a,b,und c: Zeitlicher Verlauf von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg für eine harmonische Bewegung

Die blaue Fläche unter der roten Kurve (in Abb. 3.2a) müsste in diesem Sinne die Amplitude der Schwinggeschwindigkeit ergeben: d.h.

$$v_0 \approx a_0 \cdot T \cdot \frac{1}{6} \quad \text{oder exakt berechnet:} \quad v_0 = a_0 \cdot T \cdot \frac{1}{2\pi}$$

In analoger Weise lässt sich die Wegamplitude aus der Geschwindigkeit berechnen, indem man die Fläche unter dem Geschwindigkeitssignal bestimmt. Die grüne Fläche in Abb. 3.2b zeigt das Integral der Geschwindigkeit von t = 0s bis t = 1s und ergibt den Weg zum Zeitpunkt t = 1s. Dies entspricht der Doppelamplitude (Abb. 3.2c). Aus diesen Zusammenhängen ergeben sich die äußerst nützlichen Umrechnungsformeln:

$$a_0 = v_0 \cdot 2\pi f \qquad d_0 = v_0 \cdot \frac{1}{2\pi f}$$

mit denen sich aus der Schwinggeschwindigkeit Beschleunigungs- und Wegamplitude berechnen lassen. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Formeln nur für einigermassen harmonische Schwingungen zuverlässige Werte für die maximale Beschleunigung oder Auslenkung ergeben.

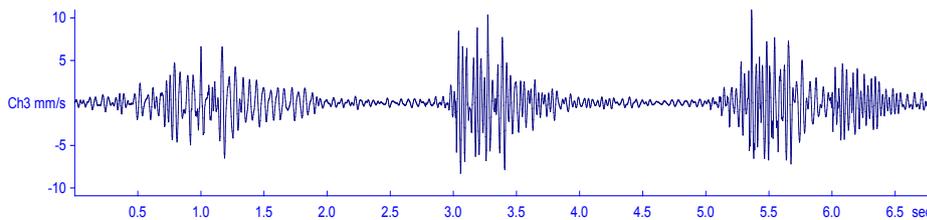
### 3.2 Auswertung im Zeitbereich

Bei der Auswertung im Zeitbereich wird das Signal als Zeitreihe belassen, d.h. das Signal bleibt eine Funktion der Zeit. Im Gegensatz dazu wird bei der Auswertung im Frequenzbereich, wie sie im Kapitel 3.3 besprochen wird, das Signal durch Transformation in den Frequenzbereich umgewandelt, so dass das Signal als Funktion der Frequenz betrachtet werden kann.

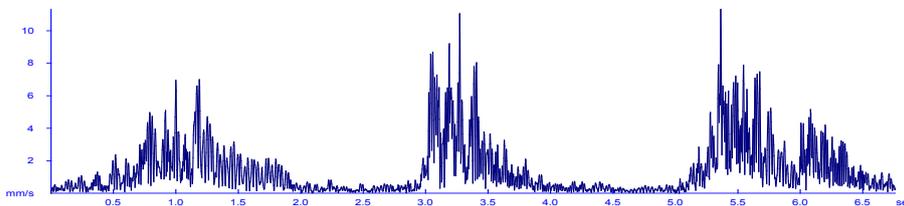
Die wichtigsten Auswertungen im Zeitbereich sind:

- Maximalwert
- Gleitende Mittelwerte
- Integration
- Differentiation

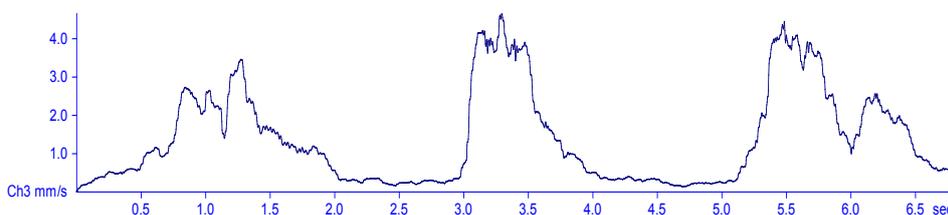
Im Allgemeinen stellen diese Auswertungen keine besonderen Probleme dar, weshalb sie hier nur kurz besprochen werden sollen.



**Abb. 3.3a:** Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf für vertikale Komponente (v(t))



**Abb. 3.3b:** Zeitlicher Verlauf der Vektorsumme (v<sub>R</sub>(t))



**Abb. 3.3c:** Zeitlicher Verlauf des gleitenden Mittelwertes mit Zeitkonstante von 1/8 s.

Maximalwerte lassen sich bei digitalen Signalen sehr einfach bestimmen, vorausgesetzt, dass die Null-Linie bekannt ist. Oft behilft man sich mit einer einfachen Null-Linien-Korrektur, bei der z.B. angenommen wird, dass der Mittelwert des gesamten Signals dem Nullwert entspricht. Die Vektorsumme berechnet sich – für jeden Zeitschritt – als Wurzel aus der Quadratsumme der drei Komponenten. Gleitende Mittelwerte werden für die in manchen Normen vorgeschriebenen Effektivwert-Bestimmungen verwendet. Dabei wird, wie in Abb. 3.4 dargestellt, ein Zeitfenster der Länge T mit einer bestimmten Gewichtungsfunktion w gebildet.

Alle Werte des Signals innerhalb des Zeitfensters werden nun quadriert, mit der Gewichtungsfunktion  $w(i)$  multipliziert und schliesslich gemittelt. Durch sukzessives Verschieben des Fensters um jeweils einen Zeitschritt  $\Delta t$  entsteht ein neues Signal, der so genannte „Gleitende Mittelwert“ oder „Gleitende Effektivwert“.

Zwei Fenstertypen trifft man häufig in den Normen, das Rechteckfenster und das Exponentialfenster. Wird bei beiden Fenstertypen die Zeitkonstante gleich gewählt, so ergeben die beiden Verfahren bei harmonischen Signalen die gleichen Ergebnisse. Bei realen Signalen ergeben sich Abweichungen in der Grössenordnung von 5 bis 10 %.

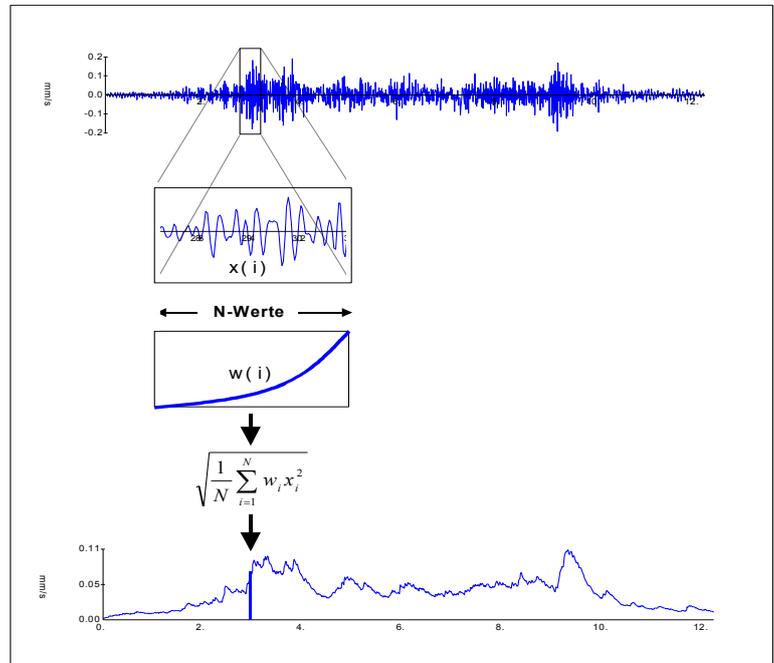
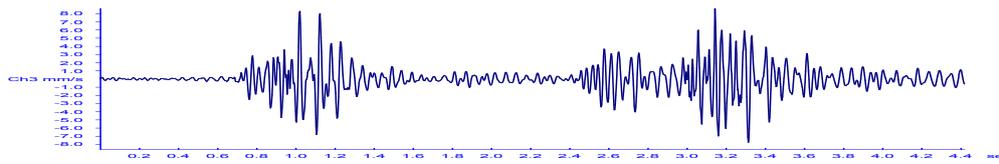


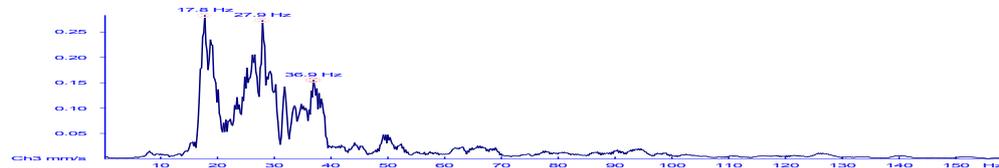
Abb. 3.4: Berechnung des „Gleitenden Mittelwertes“

### 3.3 Auswertung im Frequenzbereich

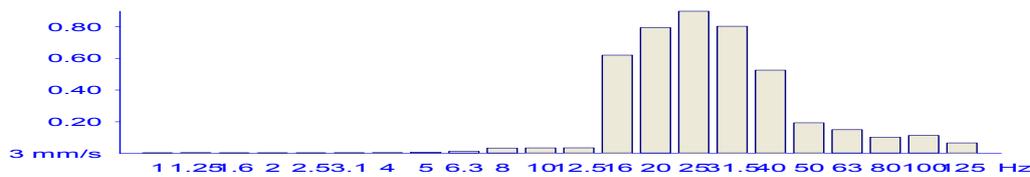
Die Darstellung eines Erschütterungssignals im Frequenzbereich lässt uns Eigenschaften einer Schwingung erkennen, die wir aus dem Signal selbst (d.h. im Zeitbereich) niemals entnehmen könnten. In Abb. 3.5a bis c sind ein Schwingungssignal und zwei zugehörige Darstellungen im Frequenzbereich, das Amplitudenspektrum und das Terzbandspektrum dargestellt. Das Amplitudenspektrum erlaubt eine exakte Identifizierung der dominanten Frequenzen ohne uns jedoch eine (leicht verständliche) Angabe über die Stärke der Schwingung zu machen. Das Terzbandspektrum gibt uns eine etwas gröbere Aussage über die Frequenzspitzen, erlaubt jedoch ein exaktes Ablesen der Schwingstärke in den einzelnen Frequenzbändern. Dabei ist allerdings auf die Definition der Terzbanddarstellung zu achten: Mittelwert-Terzbandspektren stellen eine Mittelung über die Messperiode dar, Maxhold-Terzspektren hingegen die Schwingung in der stärksten Phase. Dazu kommt noch die Unterscheidung zwischen Varianz-treuer und Amplituden-treuer Darstellung, wobei die erstere um einen Faktor 1.4 kleiner ist als die letztere.



**Abb. 3.5a:** Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf für vertikale Komponente ( $v(t)$ )



**Abb. 3.5b:** Amplitudenspektrum für Signal in Abb. 3.5a



**Abb. 3.5c:** Mittelwert-Terzbandspektrum für Signal in Abb. 3.5a

### 3.4 Messort

Der Wahl des richtigen Messortes kommt eine sehr grosse Bedeutung zu. Grundsätzlich wird man immer dort messen, wo kritische Schwingungen auftreten könnten. Für die Beurteilung der Erschütterungseinwirkung auf ein Gebäude wird man in der Regel an den Aussenmauern oder auf dem Gebäudefundament messen. In Fussboden-Mitte sind kaum kritische Schwingungen zu erwarten, da eine Geschossdecke bereits für den normalen Gebrauch für stärkere Schwingungen ausgelegt ist. Für die Beurteilung der Erschütterungseinwirkung auf Menschen hingegen wird man in Fussmoden-Mitte messen, denn dort werden die stärksten auf den Menschen einwirkenden Schwingungen auftreten. Bei Maschinen oder empfindlichen Anlagen wird man einen Messpunkt auf dem Fussboden unter oder neben der Anlage wählen.



**Abb. 3.6a:** Messpunkt in Fensternische



**Abb. 3.6b:** Messpunkt in Raumecke



**Abb. 3.6c:** Messpunkt auf Betonboden bei aufgeständertem Boden

Die Wahl des richtigen Messortes ist nicht immer einfach. Oft lässt sich ohne Testmessungen gar nicht entscheiden, welches der richtige Messort ist. Bei Messungen nach bestimmten Normen geben die Normen Hinweise für die richtige Aufstellung der Sensoren. Bei Messungen für empfindliche Anlagen sollten die Angaben der Anlagen-Hersteller konsultiert werden.

### 3.5 Messbereich

Der zur Verfügung stehende Messbereich wird durch den Typ und die Bauart des verwendeten Sensors bestimmt. Geschwindigkeitssensoren bieten in der Regel eine höhere Auflösung im tieffrequenten Bereich. Für Bauwerksschwingungen sind sie bestens geeignet. Beschleunigungssensoren kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn die Grenzwerte bereits in Form von zulässigen Beschleunigungen formuliert sind.

Abb. 3.7 zeigt als Beispiel die Messbereiche der beiden Sensoren MS2003+ (Geschwindigkeit) und 2004+ (Beschleunigung) von SYSCOM. Mit diesen beiden Sensoren lassen sich – wie die eingezeichneten typischen Anwendungsgebiete zeigen – praktisch alle Messaufgaben im Bereich der Bauwerksdynamik bewältigen. Die blaue Linie in Abb. 3.7 gibt die menschliche Wahrnehmungsgrenze für Erschütterungen an. Zwischen 5 Hz und 80 Hz verläuft diese Linie im Geschwindigkeitsdiagramm horizontal, was bedeutet, dass unser Empfinden für die Schwinggeschwindigkeit in diesem Bereich geschwindigkeitsproportional und frequenzunabhängig ist.

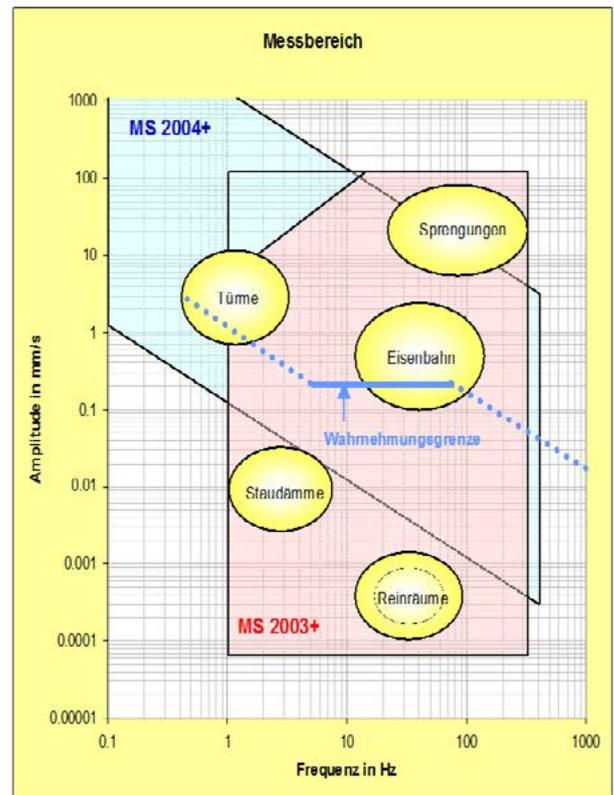


Abb. 3.7: Messbereiche und Anwendungsgebiete

In Abb. 3.8 sind die Anforderungen an den Mess- und Frequenzbereich für normale Erschütterungsüberwachungen und für Erschütterungsüberwachungen mit besonderen Anforderungen zusammengestellt. Erhöhte Anforderungen gelten vor allem bei Überwachungen für empfindliche Anlagen.

	Messgröße	Normale Anforderung	Erhöhte Anforderung
Amplitude	Geschwindigkeit	0.01 bis 100 mm/s	0.00001 bis 100 mm/s
	Beschleunigung	0.05 bis 20 m/s <sup>2</sup>	0.0005 bis 20 mm/s <sup>2</sup>
Frequenz		5 bis 150 Hz	1 bis 300 Hz

Abb. 3.8: Anforderungen an Mess- und Frequenzbereiche

## 4 Wirkung von ES-Immissionen

Erschütterungsimmisionen können sich beim Menschen auf sehr unterschiedliche Arten auswirken. Sie können den Menschen bei der Erholung stören, bei der Arbeit beeinträchtigen oder im Extremfall in Angst und Schrecken versetzen. Bauwerke reagieren in der Regel weniger empfindlich. Es können sich Risse durch Überbeanspruchungen oder durch Setzungen bilden. Anlagen können sehr sensibel auf Erschütterungen reagieren. Oft genügen Erschütterungen im Bereich der menschlichen Wahrnehmungsgrenze (d.h. ca. 0.2 mm/s), um das richtige Funktionieren einer Maschine zu beeinträchtigen. Dies kann zu Ausschuss bei der Produktion, zu Datenverlust oder sogar zu einer Beschädigung der Anlage führen.

### 4.1 Wirkung auf Menschen

In Abb. 4.1a ist die Empfindlichkeit von Menschen, Gebäuden und Anlagen in stark vereinfachter Form dargestellt. Betreffend Wirkung auf den Menschen kann man sich folgende Faustregel merken: 0.2 mm/s = Wahrnehmungsgrenze; 2.0 mm/s = Ärgergrenze; 20 mm/s = Panik. Mit diesen drei Eckwerten lässt sich jede Schwingungsmessung leicht überprüfen und beurteilen.

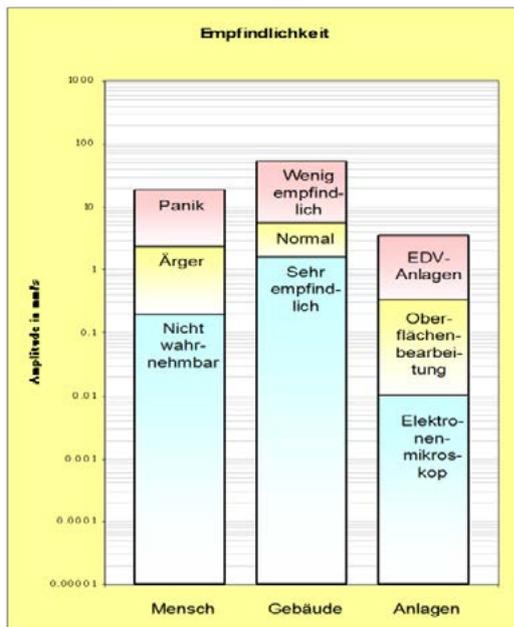


Abb. 4.1a Empfindlichkeit von Menschen, Gebäuden und Anlagen gegen Erschütterungen

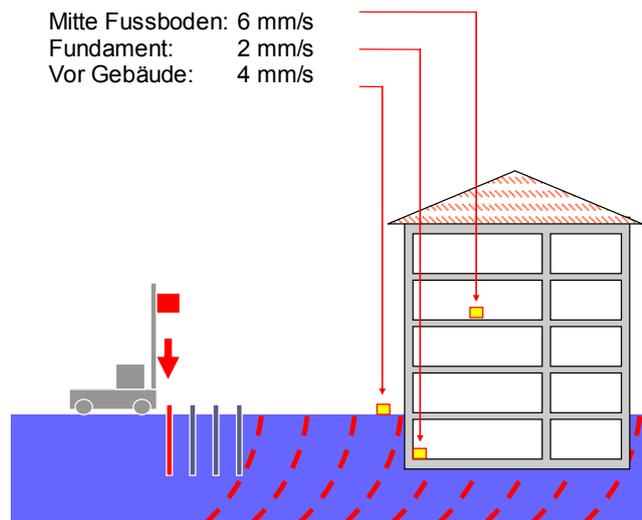


Abb. 4.1b Erschütterungen an verschiedenen Messpunkten

Da Erschütterungen durch Bauaktivitäten in der Regel von kurzer Dauer sind, ist die Wirkung auf den Menschen zumeist nicht das ausschlaggebende Kriterium. Trotzdem sollte nicht ausser Acht gelassen werden, dass die Schwingung in Mitte des Fussbodens ohne weiteres 2- bis 4-mal stärker sein kann, als auf dem Gebäudefundament, d.h. dem Punkt an dem gemessen wird (vgl. Abb. 4.1b).

### 4.2 Wirkung auf Bauwerke

Die häufigsten und auch am besten sichtbaren Zeichen von Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke sind Risse. Durch Schwingungen entstehen kurzzeitige Überschreitungen der Zug- oder Schubfestigkeit, wodurch sich Risse bilden. In Wänden und Decken stellen Risse in der Regel kein Sicherheitsproblem dar und lassen sich mit beschränktem Aufwand reparieren. In wasserdichten Wannen im Grundwasser hingegen können Risse eine ernsthafte Gefährdung der Gebrauchstauglichkeit darstellen und erfordern kostspielige Reparaturen.

Risse können auch durch Setzungen entstehen und zwar durch Setzungen, die durch die Erschütterungen selbst verursacht worden sind. Bei Gebäuden auf Seeablagerungen z.B. genügen Erschütterungen von weniger als 2 mm/s um Setzungen im cm-Bereich zu erzeugen mit entsprechenden Schiefstellungen und Rissbildungen. Eine Erschütterungsüberwachung alleine gibt in einem solchen Fall keine Gewähr dafür, dass keine Schäden entstehen.

Falls in einem Tragwerk ein Spannungszustand vorliegt, der nahe bei der Bruchspannung liegt, können Risse durch relativ geringe Erschütterungen ausgelöst werden. Solche Risse würden im Laufe der Jahre ohnehin auftreten. Haarrisse können durch Erschütterungen vergrößert oder verlängert werden, wodurch sie erst wahrgenommen werden. Schliesslich werden viele Risse, die bereits seit Jahren bestanden haben, nach einer stärkeren Erschütterungseinwirkung erstmals wahrgenommen, da – was auch verständlich ist – die Aufmerksamkeit auf diese Problematik gelenkt wird.

Durch Einhaltung der in den Normen festgelegten Richtwerte lassen sich Schäden an Bauwerken weitgehend vermeiden. Eine Gewähr, dass keine Schäden auftreten, geben die Normen-Richtwerte allerdings nicht. Man muss sich auch immer bewusst sein, dass man mit der Erschütterungsüberwachung und den dabei verwendeten Richtwerten stets eine Abwägung von zwei Interessen vornimmt: den Schutz der betroffenen Gebäude und den Wunsch des Bauherrn des neu zu erstellenden Gebäudes nach einem effizienten Bauverfahren. Eine offene Information aller Beteiligten und eine Klarstellung aller eingegangenen Risiken ist der beste Weg zur Lösung dieser Aufgabe.

### 4.3 Wirkung auf Anlagen

Die Wirkung von Erschütterungen auf Anlagen ist sehr vielfältig und lässt sich letztlich nur durch den Hersteller der Anlage richtig beurteilen. Als Orientierung mögen die in Tabelle 4.1 angegebenen Richtwerte dienen.

**Tab. 4.1** Richtwerte für einige Anlagen

Anlage	Einsatz	Richtwert für $v_{\max}$
Computeranlagen	Generell	< 2 mm/s
	PC-Anlagen	< 5 mm/s
Lithographische Anlagen	Waver-Herstellung	Herstellerangaben
Metallbearbeitung	Bearbeitungszentren	< 0.4 mm/s
	Oberflächenbearbeitung	< 0.2 mm/s
Schaltschränke	Generell	< 1 mm/s

## 5 Normen und Richtwerte

Für die Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen gilt für die Schweiz die Norm SN 640 312 a. Sie regelt allerdings nur die Einwirkungen auf Bauwerke. Für die Einwirkung auf Menschen existiert in der Schweiz keine Norm. Als Behelf kann die deutsche Norm DIN 4150/2 beigezogen werden. Für die Beurteilung der Wirkung auf Anlagen sind Herstellerangaben zu verwenden.

### 5.1 DIN 4150/2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden

In der DIN-Norm 4150/2 wird als charakteristische Grösse für die Erschütterung der KB-Wert verwendet. Dieser Wert entspricht dem gleitenden Mittelwert mit einer Zeitkonstante von 1/8 Sekunde. Zusätzlich werden die Frequenzen unter 5 Hz und über 80 Hz weggefiltert. Zahlenmässig entspricht der KB-Wert etwa der Hälfte des  $v_{\max}$ -Wertes.

Für seltene Ereignisse wie Sprengungen ist ein oberer Richtwert von 3 bis 6 KB einzuhalten, wobei der tiefere Wert für reine Wohngebiete und der höhere für Gewerbegebiete gelten. Dies entspricht einem zulässigen  $v_{\max}$  von 6 bis 12 mm/s.

Für häufigere Ereignisse verwendet die Norm einen Häufigkeits-gewichteten  $KB_{FTT}$ -Wert, der den so genannten  $A_r$ -Wert nicht überschreiten sollte. In Abb. 5.1 sind diese  $A_r$ -Werte für drei Belästigungsstufen und drei Einwirkungsperioden zusammengestellt:

	Stufe I	Stufe II	Stufe III
D < 1 Tag:	0.4	0.8	1.2
D: 6 bis 26 Tage:	0.3	0.6	1.0
D: 26 bis 78 Tage:	0.2	0.4	0.6
Normale Immissionen:	0.1		

**Abb. 5.1** Anhaltswerte  $A_r$  für Erschütterungseinwirkungen durch Baumassnahmen

Zum besseren Verständnis sollen diese Werte an einem Beispiel erläutert werden: Die Rammarbeiten für das Einbringen von Pfählen dauern ca. 2 Wochen. Die effektive Rammzeit betrage etwa 25 % der gesamten Arbeitszeit. Der zulässige  $KB_{FTT}$ -Wert beträgt gemäss Abb. 5.1 für die Stufe II (d.h. keine erhebliche Belästigung) 0.6. Damit ergibt sich ein zulässiger mittlerer KB-Wert von 1.2, was einem Wert von ca. 2.4 mm/s entspricht. Dies bedeutet, dass nach DIN 4150/2 in einem solchen Fall Erschütterungen von etwa 2.4 mm/s – gemessen in Mitte-Fussboden – noch als akzeptabel eingestuft werden. Allerdings wird für Stufe II verlangt, dass die Anwohner laufend über die Baumassnahmen und die Erschütterungseinwirkungen informiert werden.

### 5.2 SN 640 312 a: Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke

Die Norm SN 640 312 a regelt die Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke infolge Sprengungen, infolge Maschinen und Baugeräte aller Art und infolge Strassen- und Bahnverkehr. Im Wesentlichen definiert sie 4 Empfindlichkeitsklassen für die Bauwerke, 3 Häufigkeitsstufen für die Einwirkungen und gibt die entsprechenden Richtwerte an, bei deren Einhaltung keine Schäden auftreten sollten. Als charakteristische Grösse wird die maximale Vektorsumme der Schwinggeschwindigkeit ( $V_R$ ) verwendet. Als Messorte werden steife, tragende Bauteile, im speziellen die Randzonen von Deckenfeldern angegeben. Im Gegensatz zu früheren Ausgaben der Norm wird in der neuesten Ausgabe (1992) nicht mehr ein Messpunkt auf dem Gebäudefundament empfo-

len, sondern ein Messpunkt „... an einem Ort, an dem die massgebenden Auswirkungen der Erschütterungen zu erwarten sind.“

Die Empfindlichkeitsklassen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Klasse	Empfindlichkeitsklasse	Beispiele
1	Sehr wenig empfindlich	Brücken, Tunnels, Maschinenfundamente
2	Wenig empfindlich	Industriebauten, Wohnbauten, Stahlkonstruktionen, Werkleitungen
3	Normal empfindlich	Wohnbauten, Bürogebäude, Reservoire
4	Erhöht empfindlich	Häuser mit Gips- oder Hourdisdecken, neuerstellte und frisch renovierte Bauten der Klasse 3, historische und geschützte Bauten, alte Gussleitungen

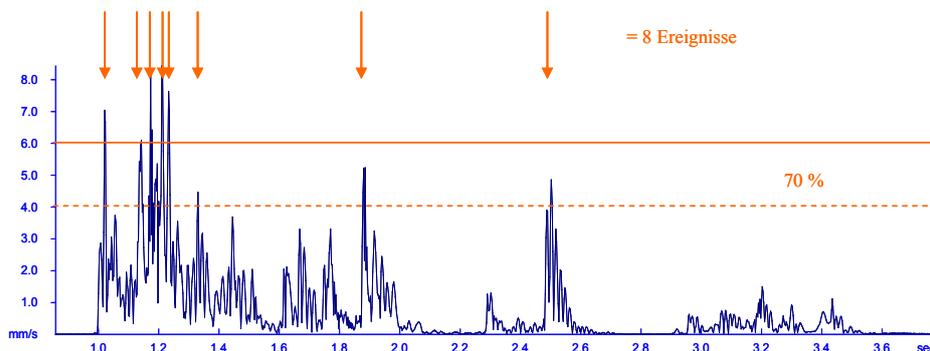
**Abb. 5.2** Empfindlichkeitsklassen

Die Häufigkeitsklassen sind wie folgt definiert:

Gelegentlich	<< 1'000 Ereignisse	Sprengungen, Vibrationsrammen (Anfahren)
Häufig		Häufige Sprengungen, Vibrationsrammen, Abbauhämmer
Permanent	>> 100'000 Ereignisse	Verkehr, Festinstallierte Maschinen, Abbauhämmer bei längerem Einsatz

**Abb. 5.3** Häufigkeitsklassen

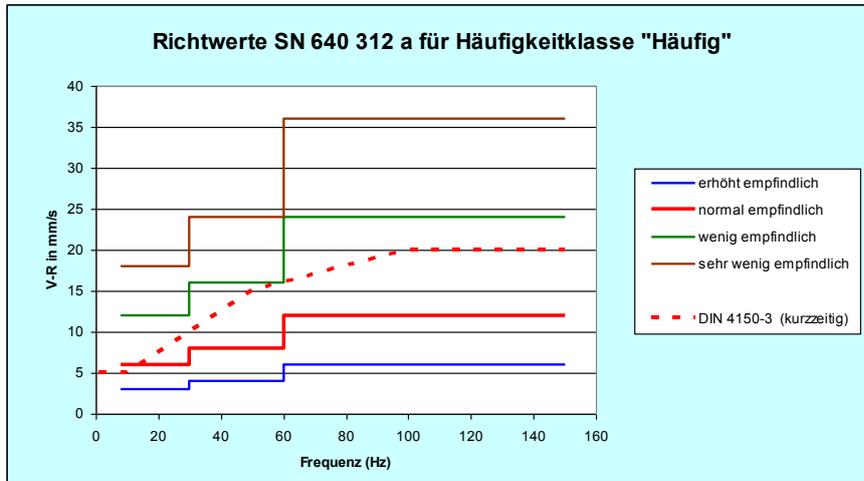
Bei der Zuteilung zu einer Häufigkeitsklasse ist die Definition des Begriffes „Ereignis“ besonders zu beachten. In Kapitel 9 der Norm 640 312 a wird nämlich definiert: „Als Einwirkung wird jeder Maximalwert des Geschwindigkeitsvektors bezeichnet, welcher 0.7 mal den Richtwert überschreitet. Als Beurteilungsintervall gilt die Zeitdauer, in der das Bauwerk der zu untersuchenden Erschütterung ausgesetzt ist.“ Somit wird eine Sprengung nicht als 1 Ereignis gezählt, sondern jede Überschreitung des 70 % Niveaus wird, wie in Abb. 5.4 dargestellt, als 1 Ereignis betrachtet. Auf diese Weise gelangen vor allem Gewinnungssprengungen in die Klasse „Häufig“ und nicht in die Klasse „Gelegentlich“.



**Abb. 5.4** Aufzeichnung einer Sprengung

Aufgrund der „Empfindlichkeitsklasse“, der „Häufigkeitsklasse“ und der dominanten Frequenz ergibt sich der einzuhaltende Richtwert. Beim Einhalten dieser Richtwerte sind kleinere Schäden kaum wahrscheinlich. Vereinzelt Überschreitungen bis zu 30 % vergrössern die Schadenswahrscheinlichkeit nur geringfügig.

In Abb. 5.5 sind die Richtwerte für die Häufigkeitsklasse „Häufig“ graphisch dargestellt. Zum Vergleich sind die Richtwerte der DIN 4150/3 für kurzzeitige Einwirkungen eingefügt.



**Abb. 5.5** Richtwerte der SN 640 312 a für die Häufigkeitsklasse „Häufig“

### 5.3 Richtwerte für Anlagen

Bei empfindlichen Anlagen wird man sich primär auf die Angaben des Anlagen-Herstellers abstützen. Allerdings ist es nicht immer einfach solche Angaben zu beschaffen. Zudem ist es oft nicht einfach diese Angaben zu interpretieren. In der Regel ist die Empfindlichkeit von Anlagen frequenzabhängig, sodass die Grenzwerte nicht als Maximalwerte für Geschwindigkeit oder Beschleunigung vorliegen, sondern als Grenzspektren. Häufig werden die in Tabelle 4.1 angegebenen Richtwerte der VC-Klassifikation verwendet. Dabei ist allerdings in jedem Fall abzuklären, ob die angegebenen Grenzwerte (in Form von Terzspektren-Amplitude) nur für Dauerschwingungen gelten oder auch für seltene Einzelereignisse.

**Tab. 4.1** VC-Klassifikation

	Anwendung	v-terz (rms)
ISO	Werkstatt	800 µm/s
ISO	Büro	400 µm/s
ISO	Wohngebäude	200 µm/s
ISO	Operationssaal	100 µm/s
VC-A	Mikrowaagen	50 µm/s
VC-B	optische Mikroskope	25 µm/s
VC-C	lithographische Geräte	12,5 µm/s
VC-D	Elektronenmikroskope	6 µm/s
VC-E	Höchstsensible Systeme	3 µm/s

## 6 ES-Ueberwachung

### 6.1 Anforderungen

Auf den ersten Blick mag die Aufgabe der Erschütterungsüberwachung recht einfach erscheinen, doch bei näherer Betrachtung wird man feststellen, dass an die Messgeräte recht hohe Anforderungen gestellt werden. Handelt es sich doch hierbei um Messgeräte, die während Wochen, Monaten oder sogar Jahren ihren Dienst zu versehen haben und in dieser Zeit keinen Augenblick aussetzen dürfen. In Abb. 6.1 sind die wichtigsten Anforderungen an ein Erschütterungsüberwachungssystem zusammengestellt.

Zuverlässigkeit:	Geeignet für Langzeit-Einsatz (Monate, Jahre) Geeignet für Baustellen-Verhältnisse (Staub, Spritzwasser)
Alarm-Sicherheit:	Alarm bei Grenzwertüberschreitung (per SMS, Mail, Fax) Alarm bei Gerätestörung (voller Speicher, leere Batterien etc.)
Daten-Sicherheit:	Nicht-flüchtiger Speicher (z.B. Speicherung auf Compact-Flash-Karten) Kalibrierte Sensoren (ca. alle 2 Jahre) Redundanz (Einsatz mehrerer autonomer Mess-Stationen)
Messbereich:	Vgl. Kapitel 3.5
Einfache Installation:	Keine störenden Kabel Einfache Umplatzierung
Fernbedienung:	Gerätesteuerung per GSM, GPRS (Mobilfunk, Internet) o.ä. Daten-Download per GSM, GPRS o.ä.
Intelligente Daten-Aufzeichnung:	Ereignis-Aufzeichnung als Zeit-Verlauf Pegel-Aufzeichnung als Profil über gesamte Messdauer Programmierbare Aufzeichnung (z.B. zu jeder vollen Stunde während 5 Minuten)
Auswertung:	Roh-Signale (unbewertete Aufzeichnung in Original-Einheiten) Automatische Auswertung (Zeitbereich, Frequenzbereich, Gruppenauswertung) Normen-Vergleiche

Abb. 6.1 Anforderungen an ein Erschütterungsüberwachungssystem

### 6.2 Überwachungssysteme

In seiner einfachsten Form besteht eine Erschütterungsüberwachungs-Station aus einem Sensor (Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsaufnehmer) und einem Recorder (Daten-Logger). Durch Erweiterung mit einem GSM-Modul für die Fernsteuerung und Alarmierung erhält man eine Mess-Station, die bereits alle Anforderungen erfüllen kann (siehe Abb. 6.2a). Mit solchen autonomen Mess-Stationen können die meisten Erschütterungsüberwachungsaufgaben gelöst werden.

Mehrere Mess-Stationen können zu einem Netzwerk zusammengefasst werden (Abb. 6.2b), doch bringt dies höchstens dann Vorteile, wenn die Messungen in einem Tunnel oder einer Kaverne vorzunehmen sind, wo kein GSM-Empfang vorhanden ist. In einem solchen Fall würde das Netzwerk-Kontroll-Zentrum übertrag aufgestellt, während die Mess-Stationen mit Current-Loop-Leitungen mit der Zentrale verbunden sind.

Autonome Einzel-Mess-Station mit Fernbedienung und Alarm

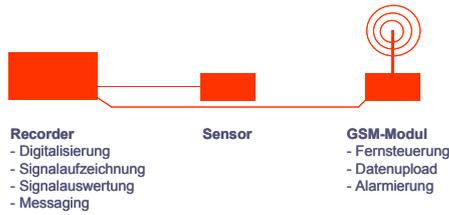


Abb. 6.2a Autonome Mess-Station

Netzwerk-Kontroll-Zentrum mit mehreren autonomen Einzel-Mess-Station mit Fernbedienung und Alarm

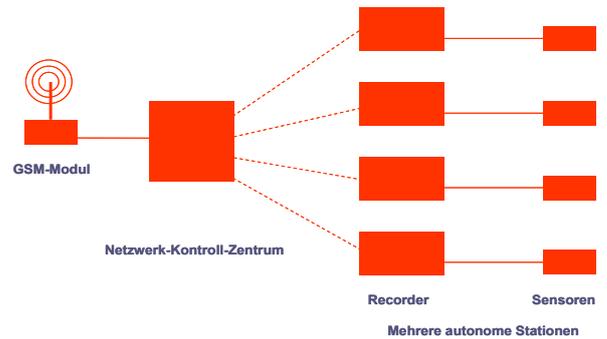


Abb.6.2b Netzwerk von autonomen Mess-Station

### 6.3 Überwachungskonzept

Eine erfolgreiche Erschütterungsüberwachung erfordert eine sorgfältige Planung und Vorbereitung. Die wichtigsten Schritte sind in Abb. 6.3 zusammengestellt.

Nr.	Aufgabe	Beschreibung
1	Abschätzung des betroffenen Bereichs	Aufgrund von Erfahrungswerten oder Abminderungsfunktionen (z.B. Abb. 2.4) wird der Wirkungsbereich der Baumassnahmen abgeschätzt.
2	Definition der kritischen Objekte	Aufgrund von Kartenmaterial und einer Besichtigung vor Ort werden die kritischen Objekte definiert und ihre Empfindlichkeit gegenüber Erschütterungen festgelegt.
3	Festlegen der Grenzwerte	Aufgrund der geplanten Baumassnahmen und der Empfindlichkeit der Objekte werden die einzuhaltenden Grenzwerte festgelegt. Bei empfindlichen Anlagen sind die Daten beim Anlagen-Hersteller zu beschaffen.
4	Definition der zu überwachenden Objekte	Aus den kritischen Objekten werden repräsentative Objekte ausgewählt, für die Mess-Stationen installiert werden sollen. Es sind so viele Objekte mit Mess-Stationen zu versehen, dass keine Unsicherheit über die Erschütterungseinwirkung im betroffenen Bereich besteht.
5	Orientierung der Bewohner	Eine vorgängige Orientierung der Bewohner, bei denen eine Mess-Station installiert wird, kann die Arbeit sehr erleichtern.
6	Erstellen des Alarmkonzepts	Im Alarmkonzept wird festgelegt, ab welchem Erschütterungsniveau ein Alarm erfolgt, wer den Alarm erhält und welche Aktionen vorzunehmen sind. Sinnvoll sind zweistufige Alarme, bei denen bei Erreichen von 50 % des Grenzwertes eine Informations-Meldung (SMS, Email) an den mit der Überwachung beauftragten erfolgt und bei 75 % eine Alarmmeldung an den Bauleiter vor Ort, an den verantwortlichen Ingenieur und an den mit der Überwachung beauftragten Ingenieur.
7	Installation der Mess-Stationen	Entsprechend den Vorgaben der zu berücksichtigenden Normen werden die Mess-Stationen installiert und ausgetestet. Dazu gehört auch das Austesten des Alarm-Systems.
8	Testphase	Wenn immer möglich sollten Probeläufe (Testspregungen, Probe-Rammungen) durchgeführt werden. Bei diesen Probeläufen muss der mit der Überwachung beauftragte Ingenieur vor Ort anwesend sein, um die Daten sofort auszuwerten. Maschinen oder Baumethoden, die zu starke Schwingungen verursachen sind durch andere zu ersetzen. Z.B. können Vibrationsrammen verwendet werden, die den Resonanzbereich nicht durchlaufen oder Pfähle vorgebohrt werden.
9	Bauphase	Während der Bauphase werden die Mess-Stationen dem Baufortschritt entsprechend verschoben. Bei Beginn einer erschütterungsintensiven Aktivität und in kritischen Phasen muss der mit der Überwachung beauftragte Ingenieur vor Ort anwesend sein, um die Daten sofort auszuwerten. In regelmässigen Intervallen wird ein Messbericht erstellt.
10	Abschluss	Deinstallation der Mess-Stationen und Schlussbericht.

Abb. 6.3 Arbeitsschritte einer Erschütterungsüberwachung