

Reduktion von Erschütterungen und Körperschall beim Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen

Reduction des vibrations et de son solidien dues à
la construction et l'exploitation des ouvrages de
transport routière et ferroviaire

GSS Bau und Planung AG, 8032 Zürich

Th. Fries, dipl. Bauing. ETH
Dr. J. Studer, dipl. Bauing. ETH

Forschungsauftrag 02/90 auf Antrag der
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

Januar 1993

Reduktion von Erschütterungen und Körperschall beim Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen

Reduction des vibrations et de son solidien dues a la construction et l'exploitation des ouvrages de transport routière et ferroviaire

Eidg. Departement des Innern, Forschungsauftrag No. 2/90

Th. Fries, dipl. Bauing. ETH
Dr. J. Studer, dipl. Bauing. ETH
GSS Bau und Planung AG, 8032 Zürich
G. Rutishauser dipl. Bauing. ETH, Rutishauser Ingenieurbüro, 8032 Zürich

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	I
	Resumé	II
1.	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Aufbau und Gliederung	2
2.	Analyse	4
2.1	Einleitung	4
2.2	Grundlagen	4
2.2.1	Erschütterungen	4
2.2.2	Grundlagen der Schwingungs- und Wellenlehre	6
2.3	Erschütterungsquellen	16
2.3.1	Ursache von Erschütterungen	16
2.3.2	Charakterisierung von Erschütterungsquellen	17
2.4	Übertragungsmedium	28
2.4.1	Erschütterungsausbreitung	28
2.4.2	Koppelung Quelle - Boden	28
2.4.3	Ausbreitung im Boden	30
2.4.4	Koppelung Boden - Bauwerk	34
2.5	Empfänger	36
2.5.1	Einleitung	36
2.5.2	Bauwerke	37
2.5.3	Anlagen/Geräte	39
2.5.4	Mensch	41
2.6	Liste der massgebenden charakterisierenden Faktoren	44
3.	Vorhersagen und Messungen	46
3.1	Methoden zur Bestimmung der Erschütterungsausbreitung	46
3.2	Vorhersage	47
3.3	Erschütterungs- und (Körper-)Schallmessungen	48
4.	Beurteilung	52
4.1	Einleitung	52
4.2	Generelle Aspekte	52
4.3	Vorgehen	52
4.4	Beurteilungsgrössen	53
4.5	Beurteilungskriterien	56
5.	Planung und Kontrolle	61
5.1	Planung	61
5.2	Fallbeispiele	64
5.3	Kontrolle	75
6.	Massnahmen	78
6.1	Einleitung	78
6.2	Strategien	78
6.3	Wo sind Reduktionsmassnahmen anzusetzen	79
6.4	Massnahmenkatalog	80
7.	Literaturverzeichnis	141

Zusammenfassung

Behörden, Bauherrschaften, Projektanten und Unternehmer sehen sich heutzutage häufig mit Erschütterungs- oder Körperschallimmissionen infolge Bau oder Betrieb von Verkehrsanlagen konfrontiert.

Gemäss dem Umweltschutzgesetz (Art. 15 USG) sind Belastungsgrenzwerte sowohl für Lärm (Aussenlärm und Körperschall) als auch für Erschütterungen festzulegen. Die technischen Grundlagen für die Ausarbeitung rechtskräftiger Verordnungen dafür sind bei Bundesstellen in Bearbeitung. Nach Inkrafttreten dieser neuen Verordnungen werden sich zwangsläufig Situationen ergeben, bei welchen die gesetzlich zulässigen Immissionswerte überschritten werden und deshalb Massnahmen zur Reduktion notwendig werden.

Dieser Bericht führt einen kompletten Katalog von erprobten, möglichen Massnahmen zur Reduktion von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen infolge Verkehrsanlagen auf. Jede Massnahme wird in übersichtlicher Art und Weise beschrieben und beurteilt. Auswahltabellen erleichtern die Eruiierung der wirksamen Reduktionsmassnahme bei einem konkreten Problem. Im allgemeinen können Massnahmen bei der Erschütterungsquelle (Verkehrsanlage, Baumaschinen), im Übertragungsmedium (Boden) oder beim Empfänger (Bauwerk, empfindliche Anlagen und Geräte sowie Mensch) angeordnet werden. Neben baulichen Möglichkeiten können rein organisatorische oder betriebliche Massnahmen wirksame und kostengünstige Alternativen bilden.

Die Arbeit beschränkt sich aber nicht nur auf die Auflistung von möglichen Massnahmen. Vielmehr wird gezeigt, wie bei erwarteten oder bereits eingetroffenen Erschütterungsproblemen vorgegangen werden kann. Die Erschütterungsausbreitung wird ausführlich charakterisiert durch Aufteilung in sequentielle Einzelvorgänge. Diese Charakterisierung bildet die Grundlage für die Problemanalyse. Ein eigenes Kapitel ist der Vorhersage und der Messung von Erschütterungen gewidmet. Anschliessend werden einige Vorschläge für die Beurteilung von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen gemacht.

Durch bewusste Vereinfachungen, klare Strukturierung und mit zahlreichen Figuren und Tabellen wurde versucht, die praktische Umsetzung dieser Arbeit zur erleichtern und so ein echtes Hilfsmittel bei der Lösung von Erschütterungs- und Körperschallproblemen darzustellen. Zwei konkrete Fallbeispiele sollen helfen, diese Vorstellungen zu verdeutlichen.

Résumé

Les autorités, maîtres d'ouvrages, les projeteurs et entrepreneurs se voient de nos jours souvent confrontés à des immissions, produites par des ébranlements ou des bruits de structure, suite à la construction ou à l'exploitation d'installations de trafic.

Selon la loi sur la protection de l'environnement (Art. 15 LPE), des valeurs limites de sollicitations doivent être établies, tant pour le bruit (bruit extérieur et **bruit de structure**) que pour des **ébranlements**. Les offices fédéraux sont en train de préparer les bases techniques pour l'élaboration et la mise en vigueur d'ordonnances en la matière. Après la mise en vigueur de ces nouvelles ordonnances, il y aura inévitablement des situations pour lesquelles les valeurs tolérées par la loi seront dépassées, ce qui entraînera des mesures pour les réduire.

Ce rapport mentionne un catalogue complet de mesures possibles pour réduire les immissions dues aux ébranlement et aux bruits de structure des installations de trafic. Chaque mesure est décrite et examinée de manière claire. Des tableaux synoptiques facilitent le choix de la mesure de réduction efficace pour un cas concret. En général des mesures peuvent être prises à la source des ébranlements (installation de trafic, machine de chantier), dans le milieu de transmission (sol) ou à l'endroit où l'effet se produit (structures, installations sensibles et appareils ou personnes). Outre des possibilités constructives, de simples mesures d'organisation ou d'exploitation peuvent constituer des alternatives efficaces et économiques.

Le travail de recherche ne se borne pas seulement à dresser la liste de mesures possibles. En outre, on explique comment procéder lors de problèmes de vibrations prévues ou déjà survenues. La propagation d'ébranlements est caractérisée en détail par subdivision en processus séquentiels isolés. Cette caractérisation constitue la base de l'analyse du problème. Un chapitre particulier est consacré à la prédiction et à la mesure des ébranlements. A la suite quelques propositions sont faites pour l'évaluation d'immissions par ébranlements ou bruits de structure.

Par quelques simplifications, une structuration claire et à l'aide de nombreuses figures et de tables, on a tenté de faciliter la mise en pratique de ce travail et de présenter un instrument valable pour résoudre des problèmes d'ébranlements ou des bruits de structure. Deux exemples de cas concrets précisent la manière d'utiliser cet instrument de travail.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Heutzutage gewinnt der Immissionsschutz im Bereich von Verkehrsanlagen immer mehr an Bedeutung. Um den knappen Raum optimal zu nutzen, werden Siedlungsgebiete vermehrt mit Verkehrsanlagen vernetzt. Bestehende Verkehrsanlagen werden mit Geschäfts- und Wohnhäusern überbaut, neue Verkehrsadern werden in Tunnels direkt unter Gebäuden hindurchgeführt oder sogar direkt in Neubauten integriert. In solchen Fällen ist nicht mehr in erster Linie der von aussen einwirkende Luftschall (Lärm) die Ursache für Störungen, sondern Vibrationen welche sich durch den Untergrund und die Bauwerke fortpflanzen und als Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall wahrgenommen werden.

Beim Bau neuer Verkehrsanlagen in besiedeltem Gebiet führen Erschütterungseinwirkungen vermehrt zu Klagen der Anwohner. Im Bauwesen treten Immissionen auf vielfältige Art und Weise auf. Schwere Geräte und Baumaschinen, wie sie besonders im modernen Tiefbau zum Einsatz kommen, verursachen neben Lärm und Gestank zum Teil auch beträchtliche Erschütterungen.

Gemäss dem Umweltschutzgesetz (Art. 15 USG), sind die Belastungsgrenzwerte sowohl für Lärm (Aussenlärm und Körperschall), als auch für Erschütterungen festzulegen. Die technischen Grundlagen für die Ausarbeitung rechtskräftiger Verordnungen dafür sind bei den Bundesstellen in Bearbeitung. Nach Inkrafttreten dieser neuen Verordnung werden sich zwangsläufig Situationen ergeben, bei welchen die gesetzlich zulässigen Immissionswerte überschritten werden und deshalb Massnahmen zur Reduktion notwendig werden.

Behörden, Bauherrschaft, Projektanten und Unternehmer benötigen deshalb Grundlagen für die Beurteilung von Massnahmen zur Reduktion von Körperschall und Erschütterungen beim Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen.

Auf dem Gebiet der Lärmbekämpfung sind in den letzten Jahren grosse Fortschritte gemacht worden. Es bestehen verbindliche Richtlinien über zulässige Immissionsgrenzwerte, Normen zur Lärmmessung und umfassende Literatur. Die Behandlung von Erschütterungs- und Körperschallproblemen hingegen steckt noch in der Entwicklung.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Charakterisierung von Erschütterungsquellen und der damit verbundenen Gefährdung durch Erschütterungen und Körperschall, sowie der Beschrieb und die Bewertung von baupraktischen Massnahmen zu deren Reduktion.

Die Arbeit beschränkt sich auf Erschütterungen, die beim Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen auftreten können; Erdbebeneinwirkungen, Erschütterungen infolge Waffenwirkung, sowie wind- und welleninduzierte Schwingungen werden nicht berücksichtigt.

Der Bericht richtet sich nicht in erster Linie an den Dynamikexperten, sondern an einen möglichst breiten Personenkreis, welcher eine praktische Grundlage zur Bearbeitung von konkreten Erschütterungs- und Körperschallproblemen benötigt.

Die Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS beauftragte die Firma GSS Bau und Planung AG, diesen Forschungsbericht auszuarbeiten.

1.3 Aufbau und Gliederung

Beim Aufbau dieser Arbeit wurde versucht, den Bericht durch Vereinfachungen, klare Strukturierung, Graphiken und Tabellen sowie mit einigen Beispielen übersichtlich und benutzerfreundlich zu gestalten.

Der Bericht ist in fünf Hauptkapitel: Analyse, Vorhersage und Messung, Beurteilung, Planung und Kontrolle, sowie Massnahmen unterteilt. Das Schwergewicht der Arbeit wird auf das Kapitel 6 'Massnahmen' gelegt, es findet sich deshalb am Schluss der Arbeit und ist in Form eines Kataloges aufgebaut. Im Kapitel 5 'Planung und Kontrolle' wird versucht, eine Strategie für der Lösung von Erschütterungs- und Körperschallproblemen aufzuzeigen. Die einzelnen Vorgehensschritte entsprechen ungefähr der Gliederung des Berichtes. Auf der folgende Seite werden die Kapitelinhalte kurz umrissen.

Kap. 2 Analyse

In diesem Kapitel werden zuerst die notwendigen Grundlagen der Schwingungslehre, der Erschütterungsausbreitung und des Körperschalleffektes vermittelt. Anschliessend wird die Erschütterungsentstehung, -ausbreitung und -einwirkung charakterisiert. Mittels Trennung in sequentielle Einzelvorgänge und mittels Bildung von Klassen wird versucht, die massgebenden charakteristischen Faktoren der Erschütterungsausbreitung aufzuzeigen. Eine Liste dieser charakteristischen Faktoren am Ende des Kapitels erlaubt einen raschen Überblick über den Mechanismus der Erschütterungs- und Körperschallimmission.

Kap. 3 Vorhersage und Messung

Um die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen beurteilen zu können, müssen die erwarteten Schwingstärken prognostiziert werden oder sofern die Erschütterungsbelastung bereits wirksam ist, die vorhandenen Schwingungen gemessen werden. Dieses Kapitel gibt einige Hinweise bezüglich den Möglichkeiten der Ausbreitungsbestimmung und der Vorhersage. Ein eigener Abschnitt ist der Erschütterungs- und Schallmessung gewidmet.

Kap. 4. Beurteilung

Es ist nicht Ziel dieser Arbeit - es würde zudem den Rahmen bei weitem sprengen - umfassende Vorschläge für Beurteilungswerte zu machen. Dieses Kapitel beschränkt sich deshalb auf einige grundsätzliche Hinweise, wie Erschütterungs- und Körperschallimmissionswerte beurteilt werden können. Es werden einige Hinweise zu bestehenden Normen und Richtlinien gegeben, welche in der Regel eine Grob-urteilung erlauben.

Kap. 5 Planung und Kontrolle

Die Kontrolle hat im Vergleich zu statischen Problemen bei dynamischen Problemen eine ungleich grössere Bedeutung. Kontrollen sind in allen Projektschritten wichtig und müssen bereits in der Planung von Reduktionsmassnahmen miteinbezogen werden. Zudem wird in diesem Kapitel aufgezeigt, wie bei der Bearbeitung von Erschütterungsproblemen vorgegangen werden sollte. Beim Vorgehen besteht ein grundsätzlicher Unterschied, ob Schwingungsprobleme erwartet werden oder ob diese bereits aufgetreten sind.

Kap. 6 Massnahmen

Dieses Kapitel enthält einen kompletten Katalog von erprobten, möglichen Massnahmen zur Reduktion von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen. Die einzelnen Massnahmen werden beschrieben und beurteilt.

2. Analyse

2.1 Einleitung

Eine geplante Verkehrsführung, welche unter bebautem Gebiet hindurchführen soll, enthält unter anderem die Gefahr, dass bei Zugsdurchfahrten Gebäude und Personen unzulässigen Erschütterungs- und Körperschallbeanspruchungen ausgesetzt werden. Solche oder ähnliche Situationen enthalten von vornherein ein gewisses Erschütterungsgefährdungspotential und erfordern deshalb der genauen Analyse der gesamten erschütterungstechnisch relevanten Parameter, um die erwarteten Immissionswerte abschätzen zu können. Somit bildet die Analyse insbesondere bei der Immissionsprognose die Grundlage für die Beurteilung.

Die Evaluation und die Dimensionierung der wirksamsten Reduktionsmassnahme bedarf ebenfalls der vorgängigen Analyse der gesamten Situation.

Die wesentlichen physikalischen Grundlagen, welche für die Behandlung der Erschütterungsausbreitung und der Körperschallbelastung erforderlich sind, werden zu Beginn dieses Kapitels aufgeführt.

2.2 Grundlagen

2.2.1 Erschütterungen

Unter **Erschütterungen** werden Einwirkungen **mechanischer Schwingungen** auf Menschen, Anlagen, Geräte, Bauwerke oder Baugrund verstanden. Die Schwingungsenergie wird in Form von Wellen durch den Untergrund weitergeleitet und regt andere schwingfähige Systeme zu Vibrationen an.

Die rechnerische Behandlung der Erschütterungsausbreitung ist sehr komplex. Dazu sind unter anderem genaue Kenntnisse der Materialeigenschaften und der Geometrie des Untergrundes und der Gebäude erforderlich. Da diese Kenntnisse in der Praxis selten im erforderlichen Umfang vorliegen, hat sich zur Untersuchung von Erschütterungsproblemen die in Fig. 2.1 dargestellte phänomenologische Modellvorstellung bewährt.

Dieses Modell unterscheidet drei Bereiche: **Quelle** (Emmission), **Übertragungsmedium** (Transmission) und **Empfänger** (Immission). Grundsätzlich beeinflusst jeder Bereich das Erschütterungsbild, denn in jedem sind schwingfähige Teile vorhanden. Die drei Bereiche können sich auch gegenseitig beeinflussen.

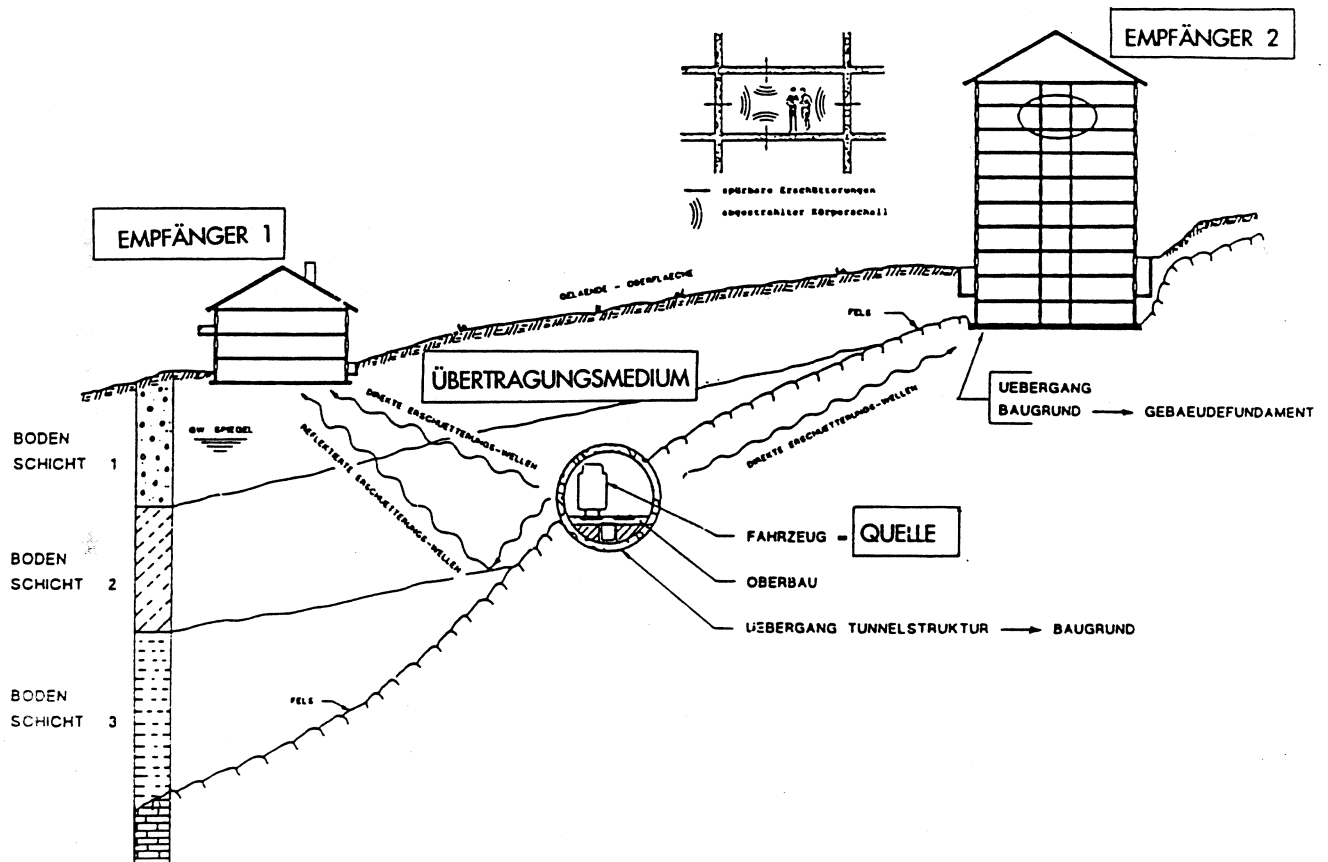


Fig. 2.1, Modellvorstellung der Erschütterungsausbreitung (Trombik, SIA D 079, Seite 50, [1])

Eine weitere Immissionswirkung als Folge von Erschütterungen ist der **abgestrahlte Körperschall**, auch sekundärer Luftschall genannt. Er entsteht in geschlossenen Räumen, indem flächige Bauteile (Decken, Böden und Wände) durch Vibrationen die Luft zu einem hörbaren Geräusch anregen.

Erschütterungsprobleme zeichnen sich demnach durch zwei verschiedene Immissionsarten (Vibrationen und Lärm) aus.

- Als **Erschütterungen** werden die an einem Empfängerstandort direkt messbaren **mechanischen Schwingungen** bezeichnet.
- Als **Körperschall**, oder richtigerweise **abgestrahlter Körperschall** wird der an einem Empfängerstandort vom Menschen **hörbare Luftschall** bezeichnet, welcher durch Vibrationen der Gebäudestruktur verursacht wird.

2.2.2 Grundlagen der Schwingungs- und Wellenlehre

A. mechanische Schwingungen:

Zeitabhängige Vorgänge, z.B. zeitliche Änderungen eines Verformungszustandes, werden **Schwingungen** genannt, wenn der Vorgang mit mindestens einem Wechsel des Vorzeichens der schwingenden Grösse abläuft.

Amplitude A heisst der maximale Augenblickswert einer sinusförmig schwingenden Grösse, bei nicht sinusförmig schwingenden Grössen spricht man vom **Scheitelwert**. Bei Erschütterungen werden gewöhnlich Bewegungsgrössen und nicht Kraftgrössen gemessen. Als Schwinggrösse kann der Weg u , die Geschwindigkeit v oder die Beschleunigung a definiert werden, wobei in den meisten Fällen die Schwing- bzw. Partikelgeschwindigkeit als relevante Grösse angegeben wird. Der kürzeste Zeitabschnitt, nach welchem die Schwingung sich jeweils periodisch wiederholt, heisst **Periode T**, der Kehrwert **Frequenz f**. Anstelle von f wird oft die **Kreisfrequenz ω** angegeben (Fig. 2.2).

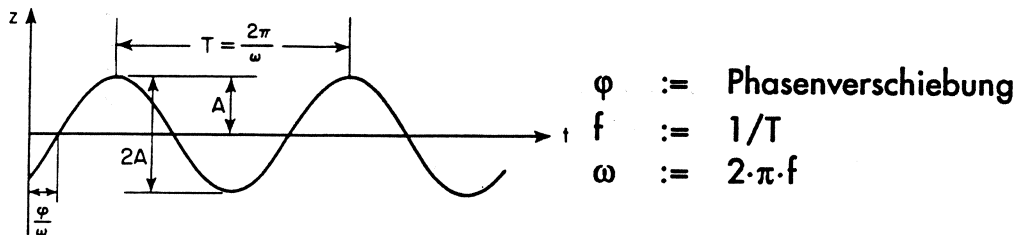


Fig. 2.2, Parameter welche eine Schwingung beschreiben

Harmonische Schwingungen lassen sich als Sinusfunktionen angeben. Nimmt die Amplitude z.B. infolge einer Reibungskraft ständig ab, so vollführt das System eine **gedämpfte Schwingung** (Fig. 2.3).

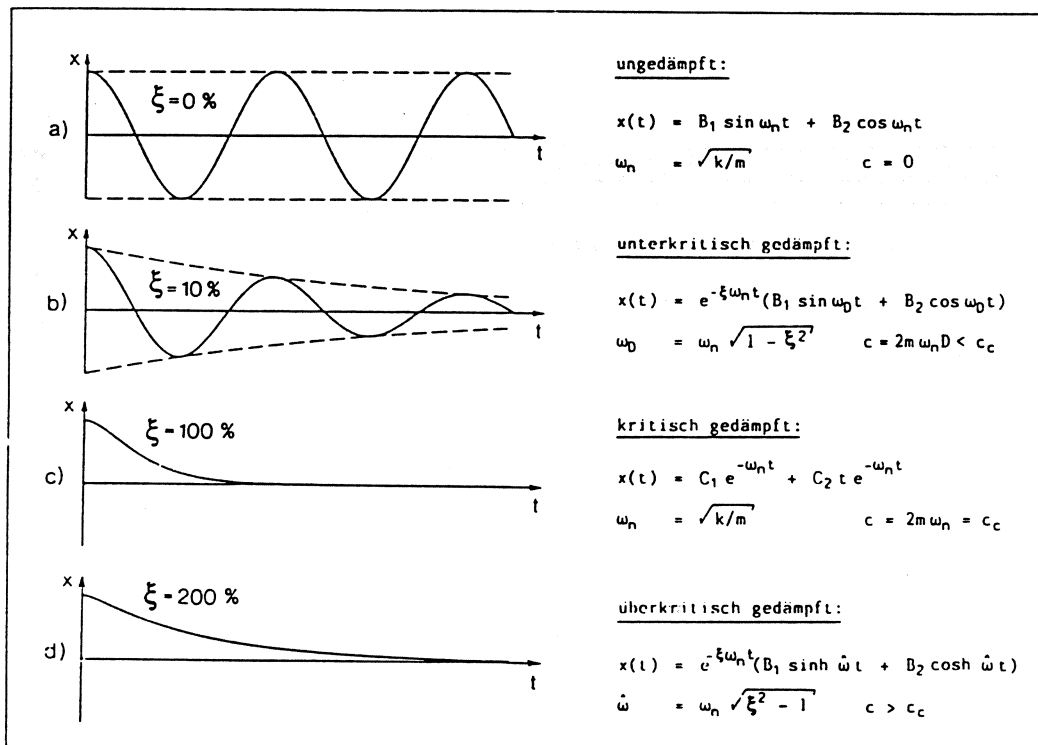


Fig. 2.3, Bewegungsverlauf einer gedämpften Schwingung (Studer, Ziegler; 'Bodendynamik', 1986 [2])

Greift am schwingenden Körper von aussen her zusätzlich noch eine periodisch veränderliche **Störkraft** $P(t)$ an, so schwingt er nach einer Einschwingzeit mit der Frequenz der äusseren Anregung (= **erzwungene Schwingung**).

Eigenschwingungen sind Bewegungen eines schwingungsfähigen Systems, das sich selbst überlassen wird, die dazugehörenden Frequenzen heissen entsprechend **Eigenfrequenzen** f_n . Die Eigenfrequenzen hängen bei einem System allein von dessen Abmessungen, den Materialkennwerten und den Auflager- und Randbedingungen ab. Systeme mit mehreren Freiheitsgraden haben ebensoviele Eigenfrequenzen wie Freiheitsgrade, zu jeder Eigenfrequenz gehört eine bestimmte Schwingungsform, die man **Eigenform** nennt.

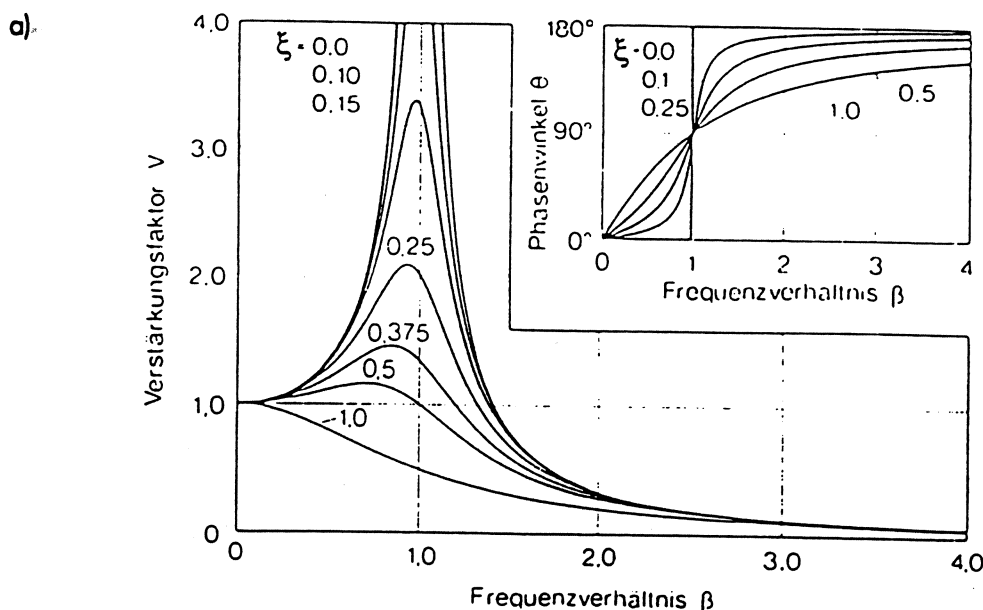
Die Amplitude der Schwingung ist um so grösser, je grösser die Amplitude der erregenden Störkraft $P(t)$. Bei gleicher erregender Kraft ist sie um so grösser, je geringer der Unterschied zwischen der Frequenz f der erregenden Kraft $P(t)$ und der Eigenfrequenz f_n des schwingenden System ist. Die maximale Auslenkung wird bei einer Frequenz, die etwa der Eigenfrequenz entspricht, erreicht. Diesen Effekt nennt man **Resonanz**. Die Amplitude an der Resonanzstelle wird umso grösser, je geringer die Dämpfung ist.

Fig. 2.4 zeigt Resonanzkurven für verschiedene **Dämpfungsmasse** ξ eines Einmassenschwingers, einmal für eine **Konstant-Kraft-Anregung** ($P(t) = P_0 \sin \omega t$) und einmal für eine **Quadratische Anregung** ($P(t) = m \cdot \omega^2 \sin \omega t$). Auf der Abszisse ist das Frequenzverhältnis $\beta = f/f_n$ und auf der Ordinate der **Verstärkungsfaktor** V aufgetragen. V ist definiert als das Verhältnis der dynamischen Einsenkung bzw. Schwingungsamplitude A zur statischen Einsenkung x_{st} unter der Erregerkraft P_0 .

Das Dämpfungsmass ist definiert als das Verhältnis:

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2 m \omega_n} \quad [\%]$$

wobei c die Dämpfungskonstante und m die Masse des Schwingensystems ist. Das Dämpfungsmass gibt die Dämpfung in Prozent von der kritischen Dämpfung $c_c = 2 m \omega_n$ an. Die **kritische Dämpfung** entspricht derjenigen Dämpfung, bei der erstmals ein aperiodischer Schwingungsverlauf auftritt (vgl. auch Fig. 2.3).



b)

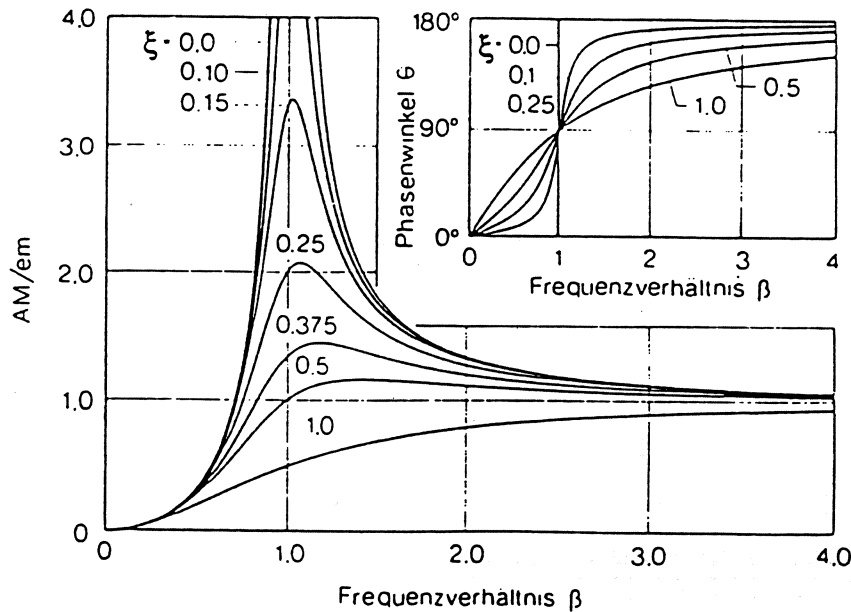


Fig. 2.4, Resonanzkurven, (a) für Konstant-Kraft-Anregung und (b) für quadratische Anregung, wobei m die Unwuchtmasse und M die Masse des gesamten schwingenden Körpers ist; Frequenzverhältnis $\beta = \text{Anregungsfrequenz } f / \text{Eigenfrequenz } f_n$ [2]

Das Resonanzverhalten kann die Schwingungsübertragung entscheidend beeinflussen. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Typen der Schwingungsübertragung: a) Die Übertragung der Schwingungen vom Erreger auf die Unterlage oder b) die Anregung eines Schwingensystems durch die Unterlage. Fig. 2.5 zeigt Kraftübertragungsfunktionen für einen Einmassenschwinger mit einem Freiheitsgrad. Diese Übertragungsfunktionen gelten für beide Typen a) und b). Auf der Abszisse ist analog zu den Resonanzkurven das Frequenzverhältnis f/f_n aufgetragen. Das Verhältnis zwischen maximaler Reaktionskraft und Amplitude der harmonischen Anregung nennt man die **Kraftübertragungsfunktion** V_R .

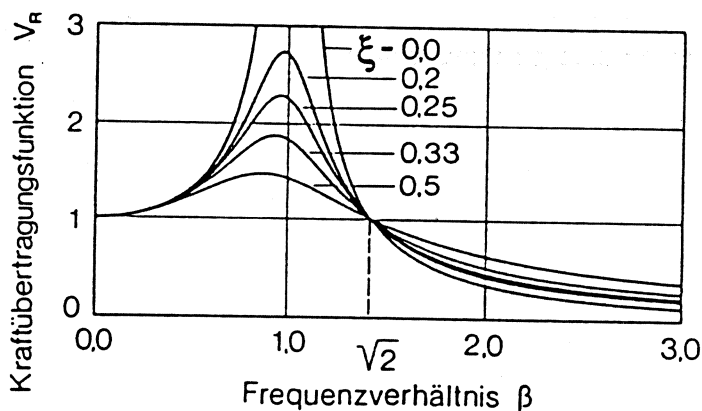


Fig. 2.5, Kraftübertragungsfunktionen für verschiedene Dämpfungsverhältnisse ξ [2].

Harmonische Schwingungen sind durch eine einzige Frequenz gekennzeichnet. Nicht-harmonische Schwingungen und Vorgänge können durch harmonische Analyse (Fourier-Transformation) in einzelne bis unendlich viele harmonische Schwingungen zerlegt werden. Die Gesamtheit der dabei auftretenden Frequenzen bildet das **Frequenzspektrum** (Fig. 2.6).

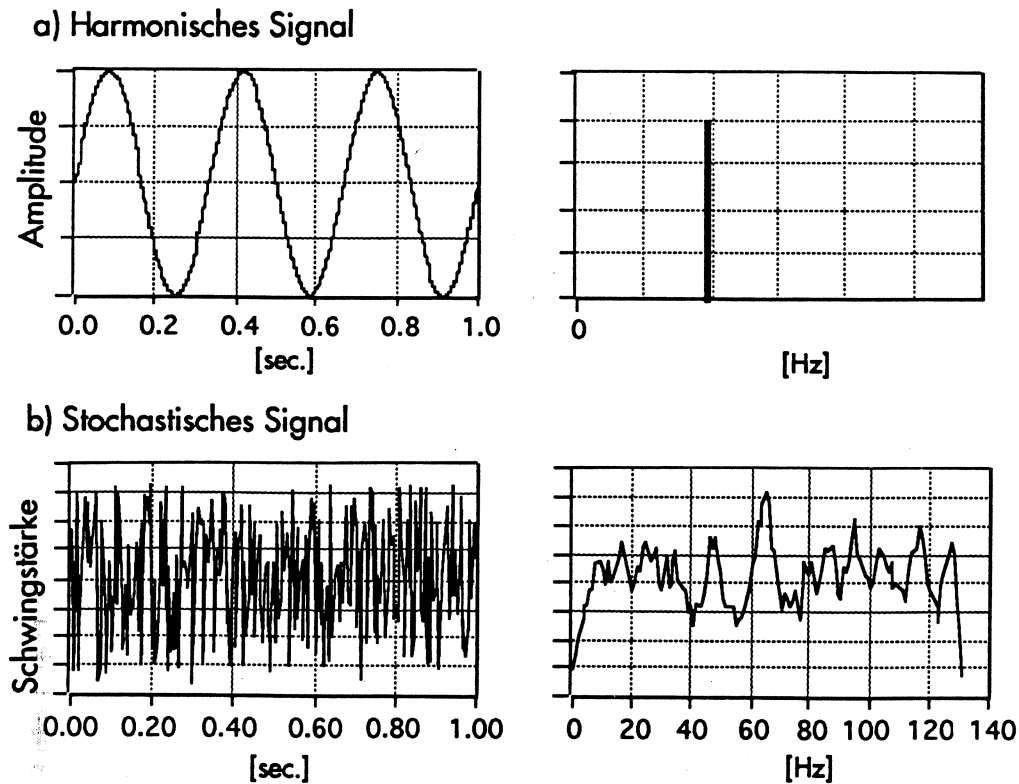


Fig. 2.6, (a) Frequenzspektrum einer harmonischen Schwingung und (b) Frequenzspektrum aus einer verkehrsinduzierten Erschütterungsmessung

B. Wellen und Schwingungsausbreitung:

Als **Welle** bezeichnet man die Ausbreitung einer Störung oder einer Anregung in einem Medium. Die Ursache für die Ausbreitung einer Welle in einem Medium ist die Koppelung zwischen den Teilchen des Mediums. Die Ausbreitung einer Welle ist mit einem **Energietransport**, aber nicht mit einem Materialtransport verbunden. Während die Schwingung die Verhältnisse an einem Punkt in Funktion der Zeit darstellt, umfasst der Begriff Welle das räumliche und zeitliche Verhalten einer Schwinggrösse.

In regelmässigen Abständen folgen sich im Medium Teilchen, die im Schwingungszustand übereinstimmen, d.h. die in **Phase** schwingen. Deren Abstand in der Welle wird **Wellenlänge** λ genannt. Bei der Ausbreitung einer Welle durch verschiedene Medien bleibt die Frequenz unverändert, hingegen ändert sich deren **Ausbreitungsgeschwindigkeit** v_p (bzw. Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit, vgl. Tab. 6.7, Seite 119). **Partikelgeschwindigkeit** v nennt man diejenige Geschwindigkeit, welche ein einzelnes, schwingendes Teilchen aufweist.

Bei Erschütterungen entstehen im Untergrund hauptsächlich **drei Wellentypen**, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit im Boden ausbreiten:

Bei den **Kompressionswellen (P-Wellen)** schwingen die Partikel in Richtung der Wellenausbreitung. Dieser Wellentyp besitzt die grösste Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Bei den **Scherwellen (S-Wellen)** bewegen sich die Partikel quer zur Ausbreitungsrichtung.

Im Gegensatz zu den räumlichen P- und S-Wellen sind **Rayleighwellen (R-Wellen)** reine Oberflächenwellen vergleichbar mit Wasserwellen. Der Einfluss der R-Wellen nimmt mit der Tiefe schnell ab und ist abhängig von der Wellenlänge λ_R und der Poissonzahl ν . Fig. 2.7 zeigt das Verschiebungsfeld einer Rayleigh-Welle im elastischen Halbraum der vertikalen sowie der horizontalen Verschiebungskomponente u . Das Diagramm zeigt deutlich, dass praktisch die ganze Energie in den oberflächennahen Schichten (Dicke $\approx$ Wellenlänge) fließt. Folglich wandern hochfrequente Wellen, d.h. Wellen mit kleiner Wellenlänge sehr nahe unter der Oberfläche, tief-frequente Wellen, also Wellen mit grosser Wellenlänge, erfassen hingegen auch Schichten in grösserer Tiefe.

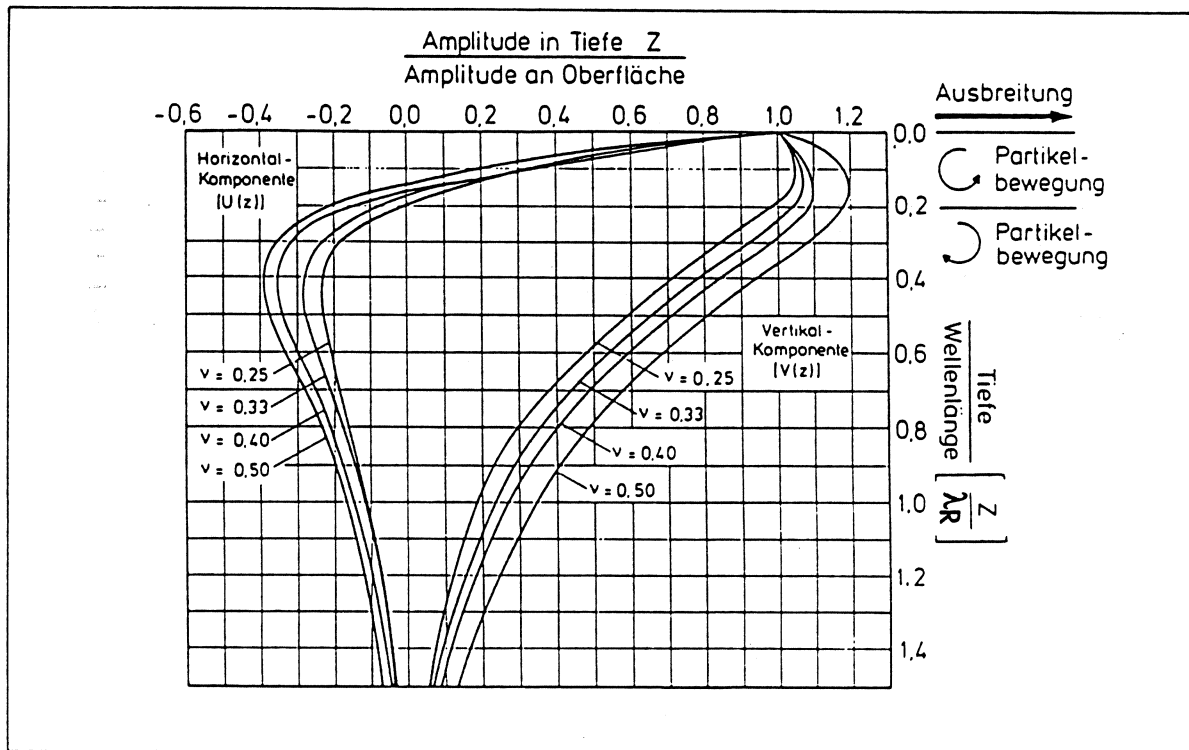


Fig. 2.7, Normierte Amplituden in Abhängigkeit der Tiefe für Rayleigh-Wellen [2].

Für die Beurteilung der Erschütterungsausbreitung durch den Untergrund kann der Begriff der **Impedanz** nützlich sein. Bei einer stationären Anregung einer Bodenschicht durch die Störkraft $P(t)$ ergibt sich eine harmonische Schwingung der Bodenverformung $u(t)$. Entsprechend dieser Verformung resultiert daraus eine harmonische Bodenreaktionskraft $R(t)$ (Fig. 2.8). Im allgemeinen wird sich eine phasenverschobene Bodenreaktion $R(t)$ einstellen. Das Verhältnis zwischen $R(t)$ und $u(t)$, dass für jede Frequenz f einen bestimmten Wert annimmt, wird als **Impedanzfunktion $K(f)$** bezeichnet. Die Impedanzfunktion hat die gleiche Form wie die Steifigkeit bei statischen Problemen. Ähnlich wie die Steifigkeit die Reaktion infolge einer Einheitsverschiebung darstellt, ist die Impedanz die dynamische Reaktion auf eine harmonische Verschiebung mit Einheitsamplitude. Die Impedanzfunktion ist abhängig von den Steifigkeits-, den Trägheits- und den Dämpfungseigenschaften des Mediums.

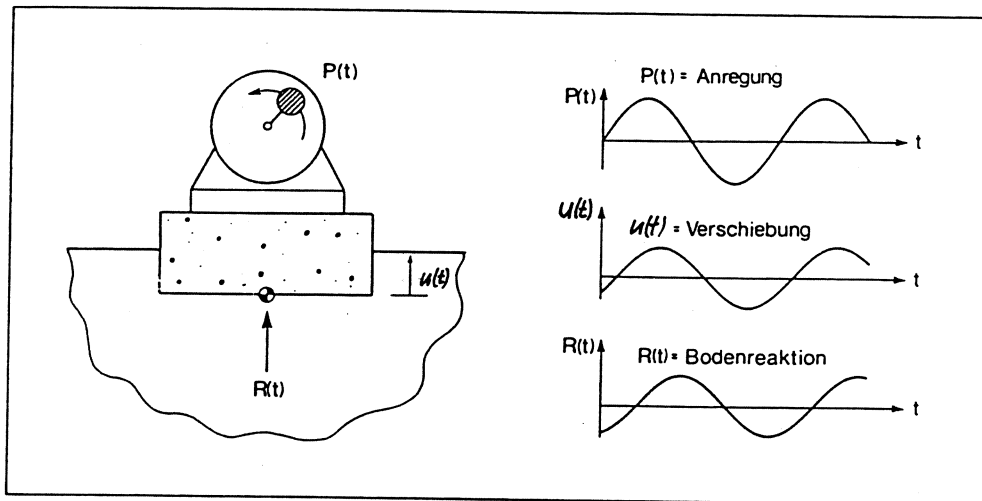


Fig. 2.8, Maschinenfundament auf elastischem Untergrund [2].

Erschütterungswellen, welche auf eine Grenzfläche zweier Medien treffen, werden - wie in Fig. 2.9 veranschaulicht - je nach Beschaffenheit der beiden Schichten teilweise reflektiert und teilweise transmittiert. Je grösser der Impedanzsprung zwischen zwei Medien, d.h. je grösser der Unterschied der dynamischen Eigenschaften Steifigkeit, Trägheit und Dämpfung, desto stärker werden die Erschütterungswellen reflektiert.

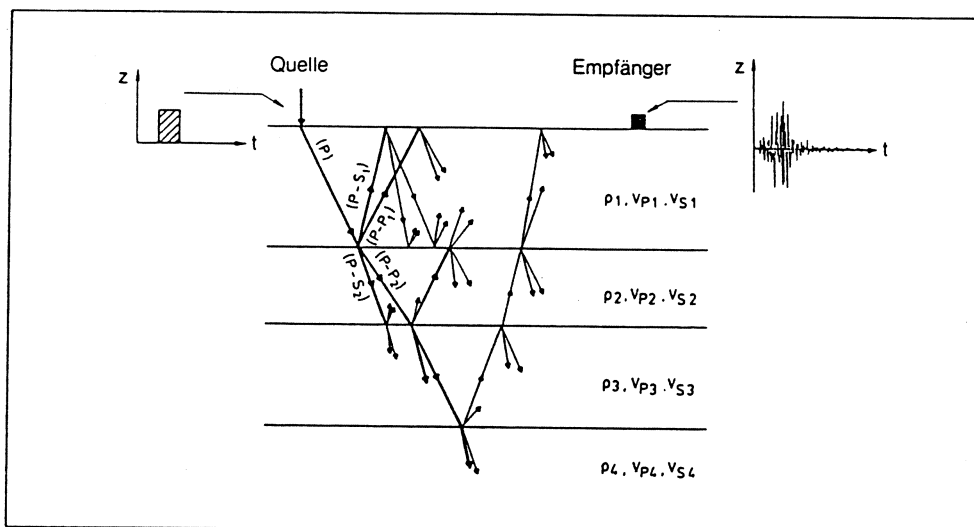


Fig. 2.9, Mehrfache Wellenreflexion und Refraktion im geschichteten Halbraum [2].

C. Luftschall:

Als Luftschall bezeichnet man Schwingungen eines Gases. Ohne Materie d.h. im Vakuum kommt kein Schall vor.

Die Bewegungen der einzelnen Luftteilchen verursachen Druckschwankungen, die sich dem statischen Luftdruck überlagern, aber wesentlich kleiner sind. Diese Druckschwankungen nennt man **Schalldruck** p . Das Ausmass der Druckschwankungen (Amplitude) wirkt sich in der **Lautstärke** aus. Die Frequenz der Luftdruckschwankungen bestimmt die **Tonhöhe**. Der Bereich des hörbaren Schalls ist nicht scharf begrenzt, denn die Wahrnehmbarkeit tiefster und höchster Frequenzen hängt wesentlich von der Lautstärke des Prüftons ab.

Im Sinne einer Konvention gilt der Frequenzbereich von ca. 16 Hz bis 20 kHz als hörbarer Schall. Tiefere Frequenzen fallen in den **Infraschallbereich**, Frequenzen über 20 kHz gelten als **Ultraschall** (Fig. 2.10).

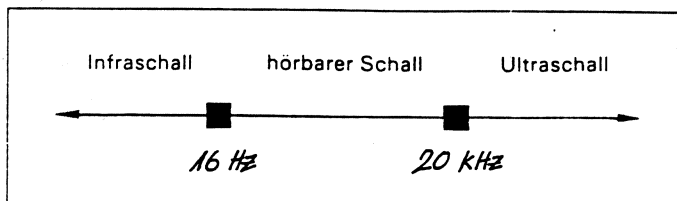


Fig. 2.10, Die verschiedenen Schallbereiche

Analog zu Erschütterungen breiten sich Luftdruckschwankungen über **Schallwellen** aus. Die **Schallgeschwindigkeit** c (Ausbreitungsgeschwindigkeit) in der Luft beträgt bei 20° C etwa 340 ms⁻¹.

Für den akustischen Vergleich verschiedener Schallquellen eignet sich am besten die abgestrahlte **Schalleistung** in Watt. Die von einer Schallquelle abgegebene **Schallenergie** ergibt sich aus der Multiplikation der Schalleistung mit der Dauer der Abstrahlung. Die **Schallintensität** entspricht der Schallenergie welche pro Sekunde durch eine Fläche von 1 m² fliesst. Schalleistung, -energie und -intensität verhalten sich proportional zum Quadrat des Schalldrucks p .

In der Akustik hat sich die Pegelschreibweise durchgesetzt. Der **Schallpegel** L_p ist der Logarithmus aus dem Verhältnis des Schalldrucks zu einem Referenzschalldruck p_0 , bzw. dem Verhältnis der Schallintensität zu einer Referenzintensität.

$L_p = 10 \log (p^2 / p_0^2) \quad [\text{dB}]$	Schallintensitätspegel	oder
$L_p = 20 \log (p / p_0) \quad [\text{dB}]$	Schalldruckpegel	(ISO 131-1979)

L_p = Schalldruckpegel in Dezibel [dB]

p = gemessener Schalldruck-Effektivwert (r.m.s.), vgl. nachfolgend [Pa]

p_0 = Referenzschalldruck = 2·10⁻⁵ Pa (≈ Hörschwelle)

Schalldruckmessungen werden heutzutage meist durch einen **Bewertungsfilter A** (vgl. Bezeichnung [dBA]) aufbereitet. Der Bewertungsfilter A verstärkt einzelne Schalldruckpegel in Abhängigkeit ihrer Frequenz. Dieser Filter entspricht näherungsweise der Schallempfindlichkeit des menschlichen Gehörs bezüglich der Frequenz.

Um verschiedene Schalldruckschwingungen sowie Erschütterungen miteinander vergleichen zu können, muss man unterscheiden zwischen **Spitzenwerten** und **Effektivwerten**. Der Spitzenwert entspricht der maximalen Amplitude der Schwinggrösse über den betrachteten Zeitbereich, der Effektivwert entspricht einem energetischen Mittelwert davon (Fig. 2.11 und Tab. 2.1).

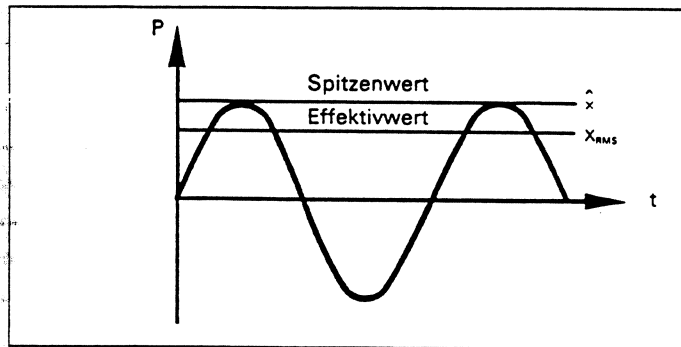


Fig. 2.11, Spitzenwert und Effektivwert einer Sinusschwingung

D. Begriffe:

Die beiden folgenden Tabellen enthalten Masse und Begriffe, wie sie für die Beurteilung und Messung von Körperschall- und Erschütterungsimmissionen üblicherweise benutzt werden.

Grösse	Symbol	Einheit	Beziehung, Bemerkung	Bezugsnorm, Quelle
Erschütterung			Messung des Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsvektors einer <i>mechanischen Schwingung</i> in einer vorgegebenen Richtung oder in allen drei Richtungen des Raumes	
Schwingweg	u	mm	Ausschlag bzw Verschiebung bei Schwingvorgang; u ist eine Funktion der Zeit: $u(t)$	
Schwinggeschwindigkeit	v	mm/s	du/dt ($v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot u$,harmon. Schwingungen)	
Schwingbeschleunigung	a	mm/s ²	d^2u/dt^2 ($a = 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot u$; harm. Schwingung)	
Scheitelwert	v	mm/s	Scheitelwert der Schwinggeschwindigkeit bei einem Schwingvorgang.	
Spitzenwert	v_{max}	mm/s	max. Scheitelwert	
r.m.s	v_{rms}	mm/s	r.m.s. = "root-mean-square"-Wert , energetischer (quadratischer) Mittelwert. $v_{r.m.s.} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} v^2(t) dt}$	ISO 2041
Effektivwert	v_{eff}	mm/s	Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit. $v_{eff} = v_{rms}$	VDI 2057/2 DIN 4150/1
KB-Wert	KB		Wahrnehmungsstärke für Menschen in Gebäuden, welcher nur im Rahmen der DIN-Norm verwendet wird.	DIN 4150/1
Schwinggeschwindigkeitspegel	L_v	dB(v)	$L_v = 20 \log \left(\frac{v}{v_0} \right)$ Die Bezugsschwinggrösse v_0 muss in jedem Falle angegeben werden. gebräuchliche Werte $v_0 = 10^{-5}$ mm/s $v_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ mm/s $v_0 = 10^{-6}$ mm/s	EMPA ISO 1683 SBB SNCF RATP deutsche Literatur

Tab. 2.1, Masse und Begriffe, wie sie für die Messung und Beurteilung von Erschütterungsimmissionen gebraucht werden.

Grösse	Symbol	Einheit	Beziehung, Bemerkung	Bezugsnorm, Quelle
Luftschall			Messung der Luftdruckänderung mittels Mikrofon als Funktion der Zeit $p(t)$	
Schallpegel	L_p	dB	Dezibel-Mass für Schalldruck oder Schallintensität $L_p = 10 \log (p / p_0)^2 \text{ oder}$ $L_p = 20 \log (p / p_0)$ p = gemessener Schalldruck [Pa] p_0 = Bezugsschalldruck = $2 \cdot 10^{-5}$ [Pa] (= Hörschwelle)	ISO 131
A-bewerteter Schallpegel	L_p	dB(A)	Der Bewertungsfilter A verstärkt einzelne Schalldruckpegel in Abhängigkeit ihrer Frequenz.	ISO 1683
energieäquivalenter Dauerschallpegel	L_{eq} oder L_m	dB(A)	Mittelungspegel nach der Formel $L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 dt \right]$	ISO 1996 VDI 2058
Ereignispegel	L_E	dB(A)	Bei Einzelereignissen zB. Zugsvorbeifahrt gemessener Schallpegel in Funktion der Zeit Meist wird der Mittelwert für eine Vorbeifahrt ausgewiesen	Eidg. Kommission für die Beurteilung von Lärm- und Immissionsgrenzwerte

Tab. 2.2, Masse und Begriffe, wie sie für die Messung und Beurteilung von Körperschallimmissionen gebraucht werden.

2.3.2 Charakterisierung von Erschütterungsquellen

Einige wenige typische Merkmale der Anregung charakterisieren die einzelnen Quellengruppen genügend genau. Zur Charakterisierung wird deshalb für jede Quellengruppe ein 'Steckbrief' (Fig. 2.13) mit den wichtigsten Faktoren zusammengestellt. Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss der einzelnen charakterisierenden Faktoren auf die Erschütterungs- und Körperschallbeanspruchung kurz umschrieben.

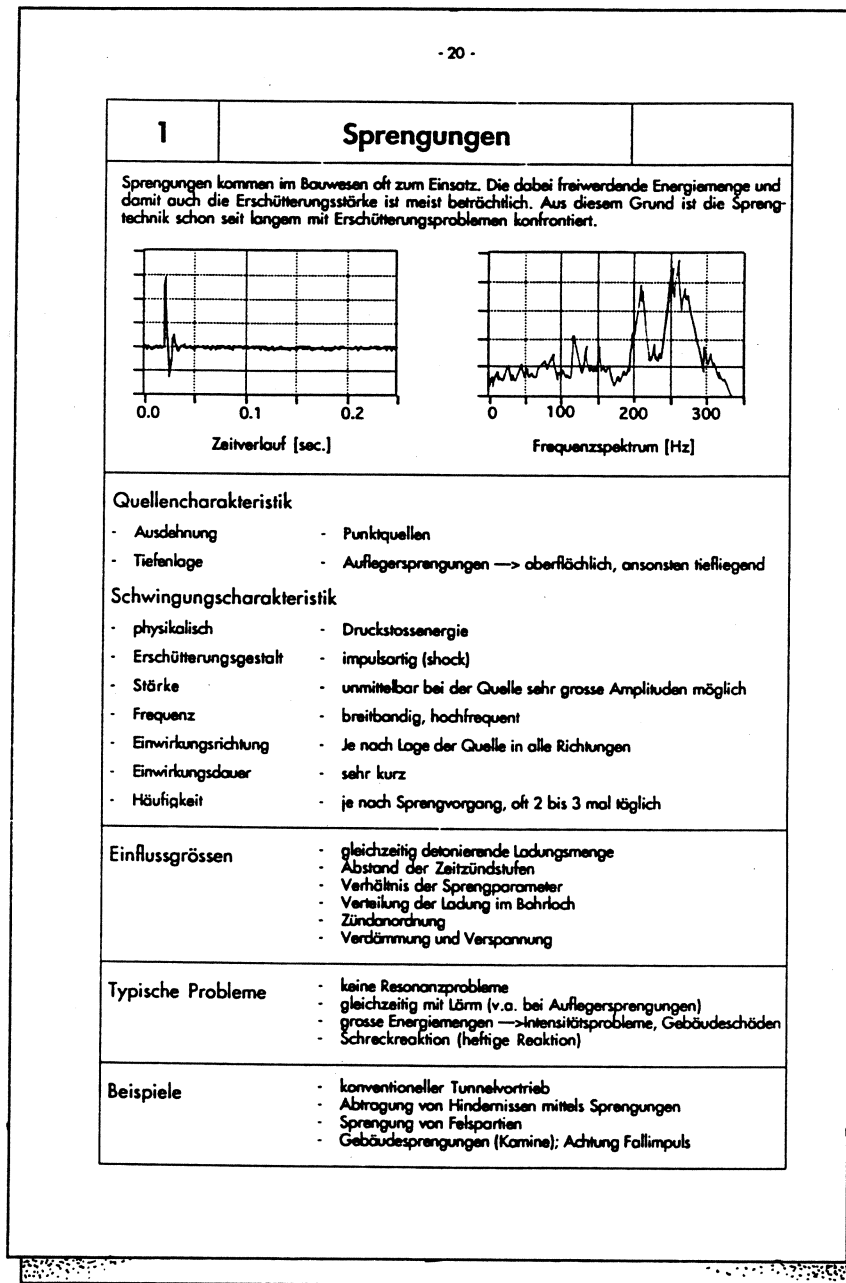


Fig. 2.13, 'Steckbrief' mit charakterisierenden Merkmalen einer Quellenklasse

2.3 Erschütterungsquellen

2.3.1 Ursache von Erschütterungen

Die eigentliche Ursache von Erschütterungen, bzw. Schwingungen sind dynamische Kräfte. Beispiele für dynamische Kräfte sind Trägheitskräfte, z.B. Fliehkräfte bei nicht ausgewuchteten Maschinen und Stösse z.B. Explosionen und Rammschläge.

Der Ausgangspunkt solcher Kräfte wird als Quelle bezeichnet. Die Abgrenzung der Quelle ist nicht immer eindeutig möglich, doch wird meistens der Übergang in den Boden als Grenze betrachtet.

Meistens genügen einige typische Merkmale der Anregung um die Erschütterungsquellen zu charakterisieren. Die beim Bau oder Betrieb von Verkehrsanlagen am häufigsten auftretenden Verursacher von Erschütterungen können in folgende acht Quellenklassen eingeteilt werden:

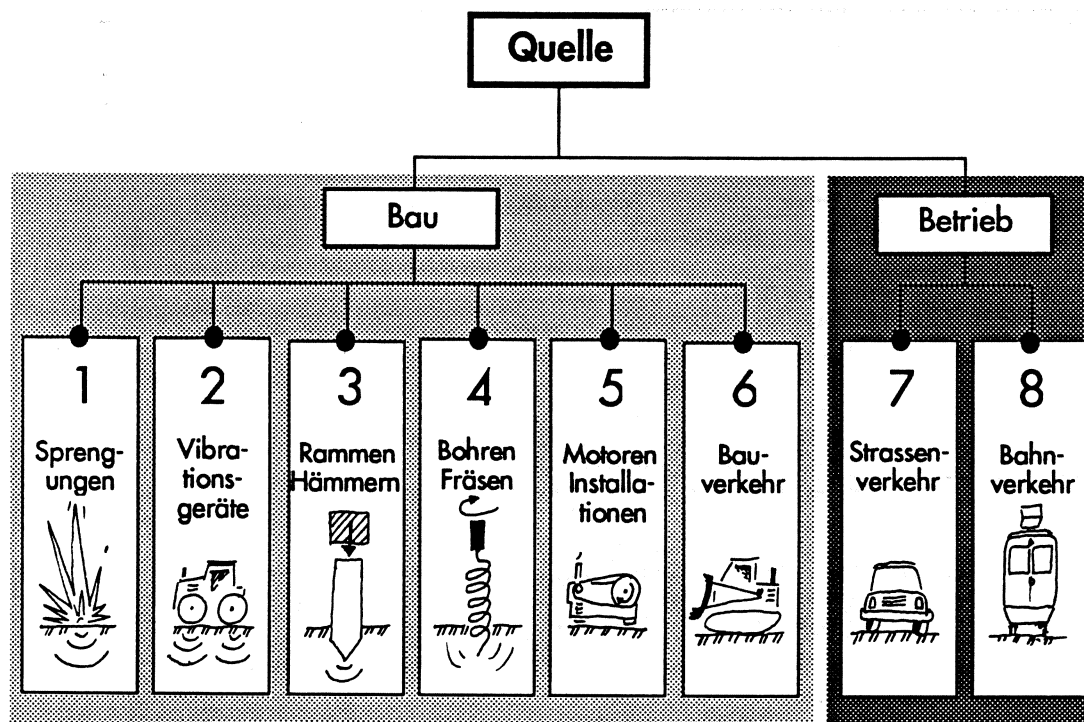


Fig. 2.12, Einteilung in acht Quellenklassen.

Baustellen zeichnen sich meist durch äusserst intensive und vielfältige Emissionen aus. So verursacht der **Bau einer Verkehrsanlage** neben Erschütterungen auch störenden Lärm, Gestank und Behinderungen aller Art, welche das Immissionsproblem zusätzlich beeinflussen. Hingegen sind Baustellen temporäre Quellen, was bei der Wahl von vibrationsreduzierenden Massnahmen eine massgebende Rolle spielen kann.

Eine andere Situation zeigt sich beim **Betrieb von Verkehrsanlagen**: Die Immissionsbelastung ist meist permanent vorhanden, entsprechend lohnt sich auch ein grösserer Aufwand für Massnahmen.

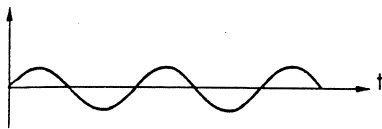
- **Nr. und Quellenklasse:**
- **Bild:** Typischer Zeitverlauf und dazugehörendes Frequenzspektrum
- **Charakteristik:**

Quellencharakteristik:

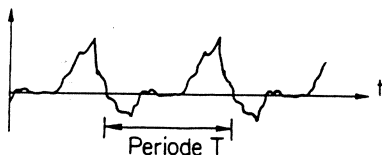
- **Ausdehnung:** Unterscheidung Punkt- und Linienquelle. Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten.
→ Kap. 2.4.3, Seite 30
- **Tiefenlage:** Je nach Tiefenlage der Quelle erfolgt die Ausbreitung der Erschütterung über Raum- oder Oberflächenwellen. Die Art der Welle beeinflusst das Ausbreitungsverhalten massgeblich. Oberflächlich liegende Quellen erzeugen vorwiegend Rayleigh-Wellen, tiefliegende hingegen P- und S-Wellen.
→ Kap. 2.2.2 B, Seite 9 und Kap. 2.4.3, Seite 30

Schwingungscharakteristik

- **physikalisch:** Schwingungsfähige Systeme können entweder durch eine periodische Störkraft (Schwingungsenergie) zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden oder durch eine Stosskraft (Stossenergie) zu Eigenschwingungen angeregt werden.
Bei erzwungener Anregung sind vor allem Resonanzeffekte zu beachten, bei der Anregung durch eine Stosskraft ist allein die Grösse und die Impulsdauer massgebend für die Schwingstärke, sofern die Stösse sich nicht vor dem Ausklingen der Eigenschwingung wiederholen.
- **Erschütterungsgestalt:**



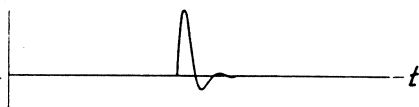
harmonisch = stationärer, sinusförmiger Verlauf



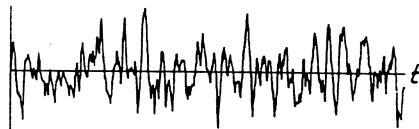
periodisch = Wiederholung eines bestimmten Schwingungsverlauf in regelmässigen Zeitabständen.



transient = vorübergehende, unregelmässige Vorgänge



impulsartig = sehr kurze Einwirkungsdauer



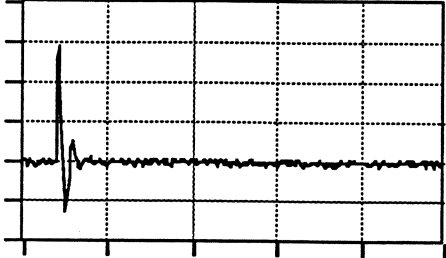
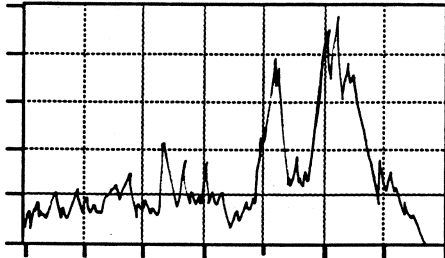
stochastisch = zufälliger Zeitverlauf

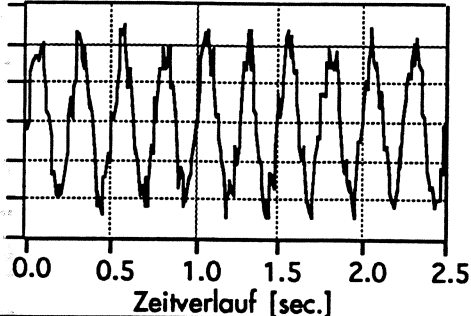
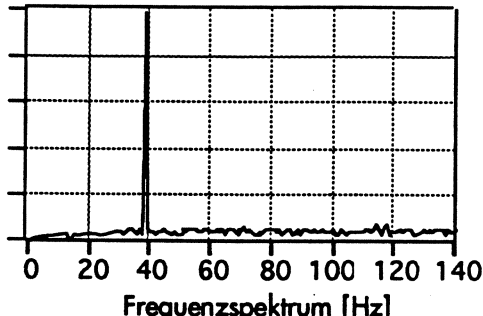
- **Stärke:** Bereich der Amplitude (Weg u , Geschwindigkeit v , Beschleunigung a oder Pegel L_v), der erfahrungsgemäss im Nahbereich der jeweiligen Quelle gemessen wird
- **Frequenz:** Angaben über typische Frequenzbereiche und die Bandbreite.

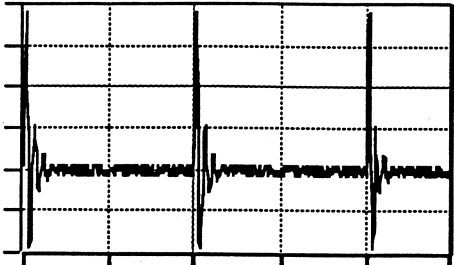
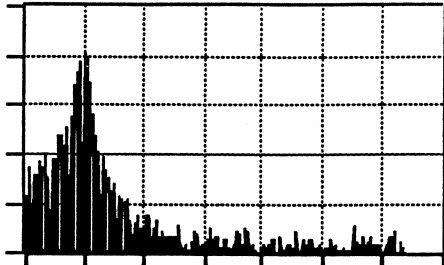
Schmalbandig = Frequenzbereich mit massgebenden Lastanteilen klein

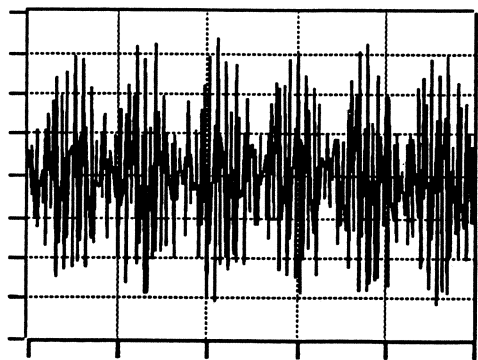
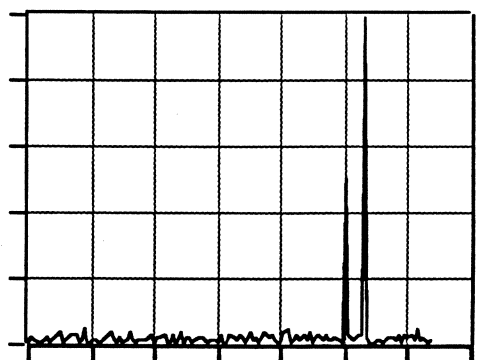
Breitbandig = relevanter Frequenzbereich gross, praktisch alle Frequenzen im Spektrum vorhanden

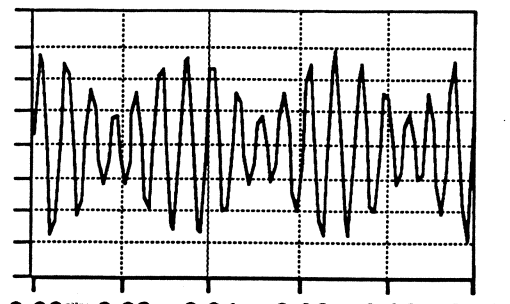
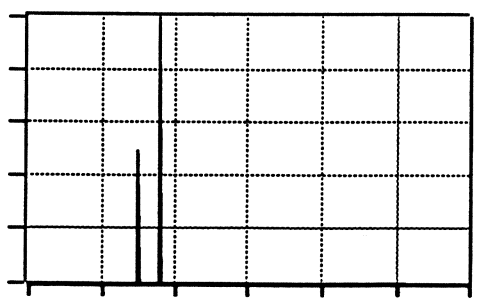
- **Einwirkungsrichtung:** längs (vertikal), quer (horizontal), torsiv, kippen:
Dieser Faktor ist unter anderem wichtig für die Festlegung der Richtung bei Erschütterungsmessungen.
- **Einwirkungsdauer:** Die Dauer der Schwingungseinwirkung kann das Auftreten von Resonanzerscheinungen beeinflussen. Die Resonanzanregung benötigt in der Regel einige Perioden. Oft sind nur qualitative Aussagen möglich. Die Dauer spielt ebenfalls eine Rolle bei der Beurteilung von sekundären Setzungsschäden oder Ermüdungsschäden. Zudem ist die Einwirkungsdauer ein massgebender Faktor bei Immissionsbelastungen von Personen.
- **Häufigkeit:** Die Häufigkeit des Auftretens von Erschütterungsemissionen spielt je nach Empfängertyp eine unterschiedliche Rolle. (Gebäude = Ermüdung; Mensch = Akzeptanz)
- **Einflussgrössen:**
Die charakteristischen Merkmale der Erschütterungsquellen können je nach Quellenklasse durch mehrere Grössen verändert und beeinflusst werden. Die wichtigsten Einflussgrössen werden hier pro Klasse kurz aufgelistet. Werden Massnahmen zur Reduktion der Erschütterungen bei der Quelle ergriffen, müssen diese bei den massgebenden Einflussgrössen ansetzen, um wirksam zu sein.
- **Typische Probleme:**
Die Erfahrung zeigt, dass auch bei sehr unterschiedlichen Quellen oft die gleichen bzw. ähnlichen, typischen Erschütterungsprobleme auftreten.
- **Beispiele:**
konkrete Beispiele, in welchen Situationen der jeweilige Quellentyp auftreten kann.

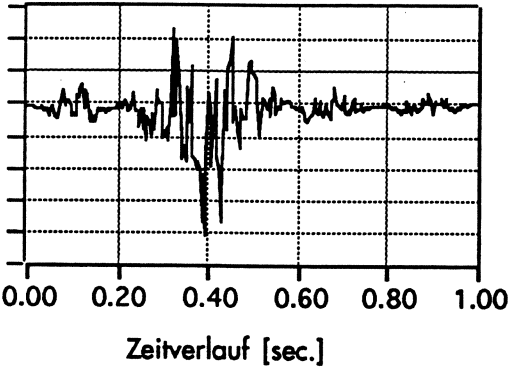
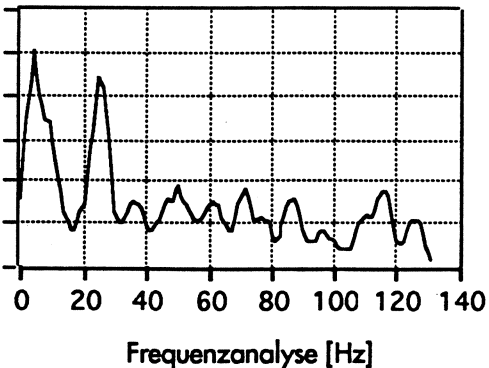
1	Sprengungen	
Sprengungen kommen im Bauwesen oft zum Einsatz. Die dabei freiwerdende Energiemenge und damit auch die Erschütterungsstärke ist meist beträchtlich. Aus diesem Grund ist die Sprengtechnik schon seit langem mit Erschütterungsproblemen konfrontiert.  Zeitverlauf [sec.]  Frequenzspektrum [Hz]		
Quellencharakteristik - Ausdehnung - Tiefenlage - Punktquellen - Auflegersprengungen → oberflächlich, ansonsten tiefliegend Schwingungscharakteristik - physikalisch - Erschütterungsgestalt - Stärke - Frequenz - Einwirkungsrichtung - Einwirkungsdauer - Häufigkeit - Druckstossenergie - impulsartig (shock) - unmittelbar bei der Quelle sehr grosse Amplituden möglich - breitbandig, hochfrequent - Je nach Lage der Quelle in alle Richtungen - sehr kurz - je nach Sprengvorgang, oft 2 bis 3 mal täglich		
Einflussgrößen - gleichzeitig detonierende Ladungsmenge - Abstand der Zeitzündstufen - Verhältnis der Sprengparameter - Verteilung der Ladung im Bohrloch - Zündanordnung - Verdämmung und Verspannung		
Typische Probleme - keine Resonanzprobleme - gleichzeitig mit Lärm (v.a. bei Auflegersprengungen) - grosse Energiemengen → Intensitätsprobleme, Gebäudeschäden - Schreckreaktion (heftige Reaktion)		
Beispiele - konventioneller Tunnelvortrieb - Abtragung von Hindernissen mittels Sprengungen - Sprengung von Felspartien - Gebäudesprengungen (Kamine); Achtung Fallimpuls		

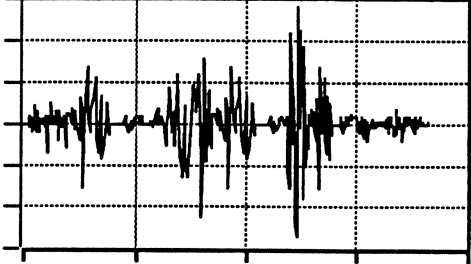
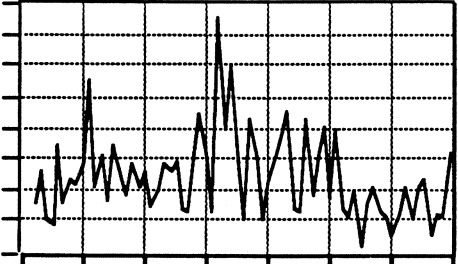
2	Vibrationsgeräte	
Im Bauwesen wird die Vibrationsenergie schon seit Jahren für verschiedene Bauverfahren, bspw für die Untergrundverdichtung oder für das Versetzen von Pfählen und Spundwänden ausgenutzt. Die Entwicklung von sehr leistungsstarken Geräten im Bauwesen vergrößerte den Wirkungsbereich beträchtlich, führte aber gleichzeitig vermehrt zu Erschütterungsproblemen. Hinzukam, dass Vibrationsgeräte im innerstädtischen Gebiet immer öfters anstelle der lärmintensiven Ramm- und Schlaggeräte eingesetzt werden.  		
Quellencharakteristik - Ausdehnung - Tiefenlage - Punktquellen - oberflächlich Schwingungscharakteristik - physikalisch - Erschütterungsgestalt - Stärke - Frequenz - Einwirkungsrichtung - Einwirkungsdauer - Häufigkeit - Schwingungsenergie - periodisch, harmonisch - gering - mittel, kaum über wenige mm/s, $v_{max} < 5 \text{ mm/s}$, auch im Nahbereich kaum über 10 mm/s - schmalbandig, meistens um 20 - 40 Hz (Achtung: entspricht oft typischem Eigenfrequenzbereich von Gebäuden und Bauteilen) - v.a. Längsschwingungen, d.h. vertikal - je nach Bauvorgang - v.a. tagsüber, dann meistens häufig		
Einflussgrößen - Arbeitsfrequenz - Leistungsstärke (bzw. Traction)		
Typische Probleme - Resonanzprobleme: Der Frequenzbereich von 20 - 40 Hz, entspricht dem typischen Frequenzbereich von Gebäuden und deren Bauteilen - Resonanzprobleme beim An- und Auslauf - Klirren von Scheiben, Gläsern - Setzungsprobleme infolge Vibrationsverdichtung (= sekundäre Erschütterungsschäden) - Körperschall		
Beispiele - Einvibrieren von Spundwänden und Pfählen - Oberflächenverdichtung (Vibrowalzen) - Tiefenverdichtung (Rüttelverfahren) - Schalungsverdichter bzw. -rüttler (zB. im Tunnelbau)		

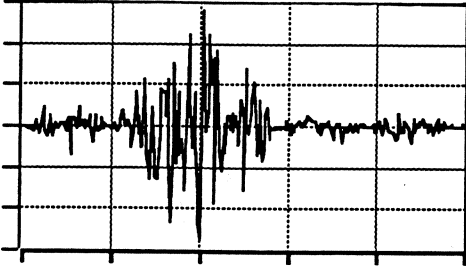
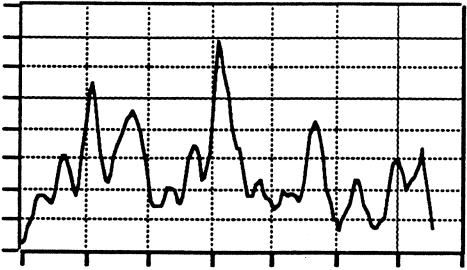
3	Rammen, Hämmern	
Gleiches wie bei den Vibrationsgeräten lässt sich auch für Bauverfahren, welche die Schlagenergie ausnützen, aussagen. Neben den Erschütterungsbelastungen sind bei Geräten dieser Klasse meist Lärmimmissionen massgebend.  Zeitverlauf [sec.]  Frequenzspektrum [Hz]		
Quellencharakteristik - Ausdehnung - Tiefenlage - Punktquellen - meist tiefliegend Schwingungscharakteristik - physikalisch - Erschütterungsgestalt - Stärke - Frequenz - Einwirkungsrichtung - Einwirkungsdauer - Häufigkeit - Schlagenergie, Erzeugung von Kompressionswellen - impulsartig, ev. periodisch - im Nahbereich: 0.2 - 20 mm/s, <50 mm/s - schmalbandig, 7 - 50 Hz, oder tiefer - längs bzw vertikal - je nach Bauvorgang, oft 2 bis 4 min. - v.a. tagsüber, häufig		
Einflussgrößen - Schlagenergie, (z.B. Gewicht des Fallbären und Fallhöhe) - Zyklusgeschwindigkeit (Schlagzahl)		
Typische Probleme - kaum Resonanzprobleme - gleichzeitig mit Lärmimmissionen - sekundäre Setzungsprobleme - Abbauhämmer werden oft bei harten Bodenschichten eingesetzt => Fels guter Wellenleiter (vgl. Erschütterungsausbreitung) - Körperschall		
Beispiele - Schnellschlaghämmer oder Freifallbären - Rammen von Spundwänden oder Pfählen - Abbauhämmer		

4	Bohren, Fräsen	
Baugeräte dieser Gruppe zeichnen sich durch stark variierende Merkmale aus. Es treten oft Körperschallprobleme auf.		
 Zeitverlauf [sec.]		 Frequenzspektrum [Hz]
Quellencharakteristik - Ausdehnung - Tiefenlage - Punktquellen - meist tiefliegend Schwingungscharakteristik - physikalisch - Erschütterungsgestalt - Stärke - Frequenz - Einwirkungsrichtung - Einwirkungsdauer - Häufigkeit - Schwingungs- und Schlagenergie - periodisch - gering - in der Regel schmalbandig, je nach Gerät auch breitbandig (vgl. Schlagbohrgeräte) —> ähnlich Klasse Nr. 3. Hämmer - keine bevorzugte Richtung - je nach Bauvorgang, permanent mit Unterbrüchen - häufig, meist tagsüber, bei Tunnelbaustellen eventuell auch nachts.		
Einflussgrößen - Leistungsstärke - Drehzahl - Ankoppelung (Baugrund)		
Typische Probleme - abgestrahlter Körperschall - kaum Resonanzprobleme - gleichzeitig mit Lärmimmissionen		
Beispiele - Anker bohren - TBM, TSM im Untertagebau - Sprengbohrlöcher - Injektionsbohrungen		

5	Motoren, Installationen	
Ein klassisches Gebiet der Bauwerks- bzw. Bodendynamik sind Maschinenfundationen. Zu diesem Thema existieren zahlreiche Fachbücher. In dieser Klasse sind v.a. Motoren und Installationen aller Art zusammengefasst, wie sie auf Baustellen vorkommen können. Entsprechend ihrer temporären Einsätze auf Baustellen sind meist nur einfache Massnahmen zur Schwingungsreduktion relevant.  Zeitverlauf [sec.]  Frequenzspektrum [Hz]		
Quellencharakteristik - Ausdehnung - Tiefenlage - Punktquellen - meist oberflächlich Schwingungscharakteristik - physikalisch - Erschütterungsgestalt - Stärke - Frequenz - Einwirkungsrichtung - Einwirkungsdauer - Häufigkeit - Schwingungsenergie - periodisch, harmonisch - gering, $v = 0.2$ bis max. 10 mm/s - schmalbandig, Frequenzbereich >10 Hz (Generatoren 25 Hz, Kolbenpumpen 5.5 Hz, Ventilator 25 Hz) - keine bevorzugte Richtung - oft ohne Unterbruch während ganzer Bauzeit - permanent, ev. auch nachtsüber		
Einflussgrössen - Leistungsstärke - Drehzahl - Unwuchten - Zustand (Lager)		
Typische Probleme - Resonanzprobleme - gleichzeitig mit Lärmimmissionen		
Beispiele - Kompressoren - Gefrieranlagen - Ventilationen zB. in Lüftungszentralen - Betonmischanlagen - Transformatoren (zB. EWZ: 50 Hz $\longrightarrow$ SBB: $16\frac{2}{3}$ Hz) - Stromerzeugungsaggregate - Umformanlage		

6	Bauverkehr	
Die charakteristischen Merkmale des Bauverkehrs gleichen stark der folgenden Klasse des Strassenverkehrs, doch muss bei der Beurteilung der beiden Gruppen von verschiedenen Gesichtspunkten ausgegangen werden. Unter den Oberbegriff Bauverkehr fallen Rad-, Raupen- und Schienenfahrzeuge. Kennzeichnend sind vor allem viele, schwere Bau- und Transportfahrzeuge einer Baustelle und die unebene Fahrbahn.  		
Quellencharakteristik - Ausdehnung - Tiefenlage - Linienquelle, zeitlich veränderliche Punktquelle - oberflächlich, ev. tiefliegend (vgl. Tunnelbaustellen) Schwingungscharakteristik - physikalisch - Erschütterungsgestalt - Stärke - Frequenz - Einwirkungsrichtung - Einwirkungsdauer - Häufigkeit - Schlagenergie infolge Baupistenunebenheiten, Raupeneinwirkung - stochastisch, transient - gering, wenige mm/s im Nahbereich - breitbandig, Frequenzbereich 0 bis 250 Hz - keine bevorzugte Richtung - kurz, je nach Bauablauf, permanent mit Unterbrüchen - häufig, meist tagsüber, bei Tunnelbaustellen eventuell auch nachts		
Einflussgrößen - Unebenheiten der Baupiste (meist gross) - Anzahl schwere Bau- und Transportfahrzeuge - Gewicht der Geräte - Schwellen, Überfahrten, Brückenprovisorien		
Typische Probleme - Erschütterungen meist dem Lärm untergeordnet		
Beispiele - Transportgeräte (Dumper, Lastwagen) - Bagger, Schaufellader, Verdichtungswalzen etc. - Umschlaggeräte (Achtung, auch herunterfallende Ausbruchmaterial kann Erschütterungen verursachen (Fallimpuls))		

7	Strassenverkehr	
Das dichte Strassennetz der Schweiz und die stetige Zunahme des Strassenverkehrs bietet zahlreiche Konfliktsituationen, bei denen auch Erschütterungen und Körperschall massgebend werden können.  Zeitverlauf [sec.]  Frequenzanalyse [Hz]		
Quellencharakteristik - Ausdehnung - Tiefenlage - Linienquelle - oberflächlich, Tunnelstrecke → tiefliegend Schwingungscharakteristik - physikalisch - Erschütterungsgestalt - Stärke - Frequenz - Einwirkungsrichtung - Einwirkungsdauer - Häufigkeit - v.a. Schlagenergie infolge Strassenunebenheiten - stochastisch, transient - gering, wenige mm/s im Nahbereich - breitbandig, Frequenzbereich 0 bis 150 Hz - keine bevorzugte Richtung - kurz (Vorbeifahrt), abhängig von der Verkehrsdichte (massgebend ist der Schwerverkehr), bei sehr dichtem Verkehr entsprechend lange Einwirkungsdauer - Anzahl LkW pro Stunde		
Einflussgrössen - Unebenheiten im Strassenbelag - Anzahl Lastwagen (PW erzeugen kaum relevante Schwingungen) - Art des Strassenbelags unbedeutend (Ausnahme Kopfsteinpflaster)		
Typische Probleme - abgestrahlter Körperschall		
Beispiele - Strassenführung durch, über bzw. unter Gebäude (zB. ETH Polyterrasse, Autobahn mitten durch Gebäude in Berlin, Wohnheim über Milchbuckeltunnel)		

8	Schienenverkehr	
Durch den U-Bahnbau in zahlreichen Grossstädten - so auch der S-Bahnbau in Zürich - sind Erschütterungs- und insbesondere Körperschallprobleme infolge Schienenverkehr seit längerem bekannt   0.00 0.20 0.40 0.60 0.80 1.00 Zeitverlauf [sec.] 0 20 40 60 80 100 120 140 Frequenzanalyse [Hz]		
Quellencharakteristik - Ausdehnung - Tiefenlage - Linienquelle - offene Linienführung - Tunnelstrecke oberflächlich tiefliegend Schwingungscharakteristik - physikalisch - Erschütterungsgestalt - Stärke - Frequenz - Einwirkungsrichtung - Einwirkungsdauer - Häufigkeit - Schwingungsenergie infolge Unwuchten der Räder, Eigenschwingungen der Wagen, Trägheitskräfte, etc. - Schlagenergie infolge Unebenheiten auf Schiene (Riffeln) und Räder, sowie Weichen, Fugen, enge Kurven - stochastisch, transient - gering, wenige mm/s - breitbandig, Frequenzbereich 0..250 Hz, hohe Amplituden zwischen 40..100 Hz, zeigt dort oft ausgeprägte Resonanzen - keine bevorzugte Richtung - kurz, eine Zugsdurchfahrt - Anzahl Züge pro Stunde		
Einflussgrössen - Weichen, enge Kurven - Rollmaterial: Schwingungen der Wagen, Unwuchten, Unebenheiten/Diskontinuitäten, nicht abgefederte Masse (Drehgestell) - Oberbautyp (Schotter oder direkte Auflagerung) - Fahrgeschwindigkeit - allgemeiner Zustand der Schienen und Räder		
Typische Probleme - abgestrahlter Körperschall - ev. Resonanzprobleme		
Beispiele - Fern-, Stadt- oder Untergrundbahnen direkt unter oder neben Gebäudefundamenten - Strassenbahnen		

2.4 Übertragungsmedium

2.4.1 Erschütterungsausbreitung

Die Schwingungsausbreitung durch den Untergrund in Form von Wellen wird von unzähligen Faktoren beeinflusst. Die physikalischen Vorgänge sind äusserst komplex.

Der Untergrund kann nur punktuell mit vernünftigem Aufwand untersucht werden, Ausbreitungsberechnungen erlauben deshalb meist nur ungenaue Aussagen (vgl. Kap. 3.1, Seite 46). Aus diesem Grund beschränkt sich dieses Kapitel auf einfache, phänomenologische Modellvorstellungen und legt mehr Gewicht auf die Beschreibung der massgebenden Faktoren und deren Auswirkungen auf die Ausbreitungsvorgänge.

In welchem Masse die bei der Quelle erzeugten Schwingungen in den Baugrund abgegeben werden, hängt von den geometrischen Abmessungen, der Steifigkeit und der Masse der Quelle und vom dynamischen Verhalten des umgebenden Bodens ab. Wie dann diese Erschütterungen im Baugrund weitergeleitet und an die Empfänger abgegeben werden, ist von den örtlichen Gegebenheiten des Baugrundes und von der Gründung der Gebäude abhängig. Wie das Bauwerk (Empfänger) selbst auf dynamische Beanspruchungen antwortet, ist dann ebenfalls von der Art der Gesamtkonstruktion sowie von der Steifigkeit, Masse und Spannweite der einzelnen Bauteile abhängig.

Aufgrund dieser Überlegungen wird zur Charakterisierung der Übertragungsverhältnisse zwischen der Koppelungsstelle Quelle - Boden, der Ausbreitung im Boden und der Koppelungsstelle Boden - Bauwerk unterschieden.



Fig. 2.14, Einfache Modellvorstellung der Erschütterungsausbreitung

2.4.2 Koppelung Quelle - Boden

Die Erschütterungsquelle kann in der Regel nicht eindeutig abgegrenzt werden, doch wird meistens der Übergang in den Untergrund als Koppelungsstelle betrachtet.

Die Verhältnisse bei der Quelle selbst und im unmittelbar angrenzenden Boden bestimmen, wieviel der Anregungsenergie in den Boden abgegeben, im Nahbereich

dissipiert und auf welche Wellentypen verteilt wird. Die Quellenwerte selbst hängen wiederum vom unmittelbar umgebenden Boden ab. Die Koppelungseigenschaften werden von zahlreichen Faktoren beeinflusst:

- dem Frequenzbereich und der Amplitude der Anregung
- der Masse der Quelle
- der Steifigkeit des angrenzenden Bodens bzw. den Eigenfrequenzen des Bodens
- den Dämpfungseigenschaften des unmittelbar angrenzenden Bodens
- den geometrischen Abmessungen der Quellenfundamente

Der von der Quelle zu erzwungenen Schwingungen angeregte Untergrund wirkt dabei als Feder, Dämpfer und Masse zugleich. Welche Schwingungsenergie überhaupt übertragen wird, kann mit vereinfachten Vorstellungen abgeschätzt werden. Tabelle 2.3 gibt diesbezüglich einige Hinweise. Einfacher und genauer ist es, sofern dies möglich ist, die Erschütterungen bei der Quelle zu messen.

	Koppelungsverluste		
	gering	mittel	hoch
Bodenart: bei breitbandiger oder hochfrequenter Anregung: • trockene Lockergesteinsböden • wassergesättigte Böden • kompakter Fels • Ton, Lehm • Sand, Kies • Lagerungsdichte hoch niedrig • Bodeninjektionen			
Quelle: • Tunnel aus Mauerwerk • Tunnel aus Beton • eingebettete Fundamente • aufliegende Fundamente • Kiesunterlage • Magerbetonunterlage			

Tab. 2.3, Charakterisierung und Wertung der Erschütterungsübertragung an der Koppelungsstelle Quelle-Boden

2.4.3 Ausbreitung im Boden

Bei Erschütterungen entstehen im Boden kleine Schubdehnungsamplituden ($\gamma = 10^{-4} \dots 10^{-2} \%$). Im Gegensatz zu vergleichsweise grossen Dehnungsamplituden bei Erdbebenbelastungen gelten für den Boden bei Erschütterungen näherungsweise linearelastische Stoffgesetze mit geringer hysteretischer Materialdämpfung.

Charakterisierung des Bodens bezüglich Schwingungsausbreitung

Die charakteristischen Faktoren bei der Schwingungsausbreitung im Boden sind:

- Distanz Quelle - Empfänger
- Bodenart
- Grundwasserspiegel
- Schichtung
- Wellentyp
- Frequenz der Anregung

Die beiden letzten Faktoren sind eigentlich schwingungsspezifische Charakteristiken (Kap. 2.3, Erschütterungsquellen, Seite 16 ff). Da aber der Wellentyp und die Frequenz der Anregung einen massgebenden Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten von Erschütterungen haben, werden diese beiden Faktoren hier ebenfalls behandelt.

Bei der Ausbreitung nimmt im allgemeinen mit zunehmender Entfernung zur Quelle die Schwingstärke ab. Infolge frequenzabhängigem Verhalten von Bodenwellen verändert sich mit der Entfernung auch das Frequenzspektrum.

• Distanz Quelle - Empfänger

Bei räumlicher Wellenausbreitung nimmt die Energiedichte und somit die Schwingstärke mit zunehmender Entfernung r aus geometrischen Gründen ab. Dieses Phänomen wird oft 'geometrische Dämpfung' genannt, obwohl es sich um keine eigentliche Dämpfung bzw. Dissipation handelt.

Bei einer Punktquelle im elastischen Halbraum - die Anregung führt zu einer sphärischen Wellenausbreitung - führt dieses geometrische Abklingen auf eine Amplitudenreduktion von r^{-1} , in der Nähe der Oberfläche beträgt die Reduktion gar r^{-2} aus Gründen, deren Erläuterung den Rahmen sprengen würde. Bei einer Linienquelle führt die Anregung zu einer zylinderförmigen Ausbreitung ($r^{-0.5}$) bzw. r^{-1} im Oberflächenbereich. Reine Oberflächenwellen (R-Wellen) breiten sich bei punktförmiger Anregung scheibenförmig aus, was zu einer Amplitudenreduktion $r^{-0.5}$ führt. Bei linienförmiger Anregung kann für R-Wellen keine Amplitudenreduktion infolge geometrischer Dämpfung festgestellt werden. In Tab. 2.4 sind diese Gesetzmässigkeiten zusammengestellt.

$A(r) = A(o) \cdot r^x$			$x =$
Wellentyp	Punktquelle	Linienquelle	
Raumwellen in der Tiefe	- 1	- 0,5	
Raumwellen an der Oberfläche des Halbraums	- 2	- 1	
Rayleighwellen (Oberflächenwellen)	- 0,5	0	

Tab. 2.4, Amplitudenreduktion mit zunehmender Entfernung r infolge geometrischer Dämpfung

Ist der Untergrund geschichtet und bestehen grosse Unterschiede in der Bodenart, bzw. grosse Impedanzsprünge zwischen den Bodenschichten (vgl. nachfolgend 'Bodenart'), so gelten die obengenannten Reduktionsgesetze nicht oder nur bedingt, da sich die Wellenenergie infolge Reflexionen nicht mehr kugel- bzw. zylinderförmig ausbreiten kann.

• Bodenart:

Je nach Bodenart und dessen Zustand variiert die Amplitudenreduktion infolge unterschiedlicher Materialdämpfungseigenschaften. Die Schwingungsenergie wird durch das Bodenmaterial dissipiert, indem nicht-elastische Verformungen auftreten. Bei den für Erschütterungen relevanten kleinen Dehnungsamplituden ist die Materialdämpfung jedoch gering. Die Materialdämpfung ist neben der Bodenart auch von der Frequenz abhängig (vgl. nachfolgend 'Frequenz der Anregung').

Einfluss des Bodentyps auf die Dämpfung:

Fels:

Konstant kleine Dämpfungsverhältnisse bei erschütterungsrelevanten Dehnungsamplituden.

Sand und Ton:

Bessere Dämpfungseigenschaften, aber grosse Streuung.

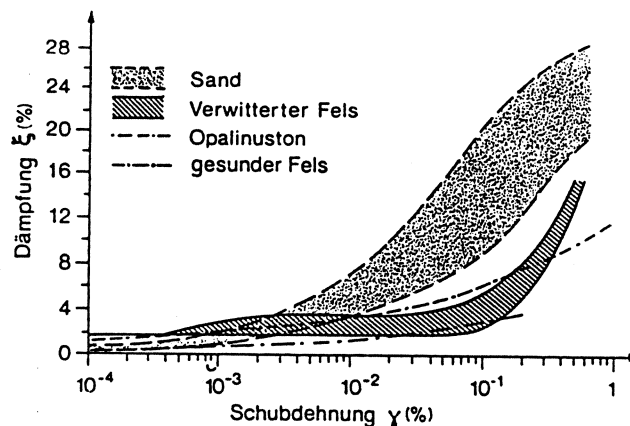


Fig. 2.15, Dämpfung von Sand, Fels und Ton im Vergleich [2].

• Schichtung:

Viele theoretische Überlegungen gehen von einem homogenen und isotropen Boden aus. In Wirklichkeit schwanken vor allem in der Schweiz die Bodeneigenschaften stark. Die Bodenschichtung kann das Erschütterungsbild infolge Reflexionen und Refraktionen beträchtlich verändern. Je grösser der Impedanzsprung zwischen zwei

Schichten, desto höher ist der Anteil der reflektierten Wellenenergie. Insbesondere harte Schichtpakete wirken als eigentliche Wellenleiter, indem die Untergrundwellen infolge Reflexionen in der Schichtlage 'gefangen' bleiben. Quer zur Schichtung sind deutlich höhere Ausbreitungsverluste zu erwarten als längs zur Schichtung (vgl. Fig. 2.9, Seite 11).

- **Grundwasserspiegel:**

Das Grundwasser ist ein guter Leiter von Kompressionswellen. Der Einfluss des Grundwassers auf die Erschütterungsausbreitung ist nicht eindeutig zu beurteilen. Reflexionen und Refraktionen können das Wellenbild - analog zur Bodenschichtung - verändern. Generell lässt sich sagen, dass die Erschütterungsausbreitung in wasser-gesättigten Böden besser als in trockenen Böden ist.

- **Wellentyp:**

Auf die drei wichtigsten Wellenarten entfallen im homogenen und isotropen, elastischen Halbraum beispielsweise bei einer vertikalen Anregung an der Oberfläche von der Schwingungsenergie 67 % auf die Rayleighwellen, 26 % auf die Scherwellen und 7 % auf die Kompressionswellen [2].

Die Rayleighwelle hat gemäss Tab. 2.4, Seite 31 auch die kleinste geometrische Dämpfung, so dass folglich ab einer bestimmten Distanz die Oberflächenwelle für das Erschütterungsbild massgebend wird.

- **Frequenz der Anregung:**

Die Amplitudenreduktion infolge Materialdämpfung ist in Böden von der Frequenz abhängig. Tiefe Frequenzen werden weniger gedämpft als hohe.

Mit zunehmender Entfernung zur Quelle werden die hohen Frequenzen gewissermassen herausgefiltert, so dass sich das Frequenzspektrum verändert bzw. sich der Schwerpunkt des Frequenzspektrums zu tieferen Frequenzen hinverschiebt. Bei breitbandiger Anregung kann infolgedessen eine beträchtliche Amplitudenreduktion mit der Entfernung festgestellt werden. Aversch (Forschungsbericht 155 BAM, 'Schienenverkehrserschütterungen' 1988, [3] Seite 55) gibt dafür eine Abnahme mit der Entfernung r von $r^{-0.5}$ an.

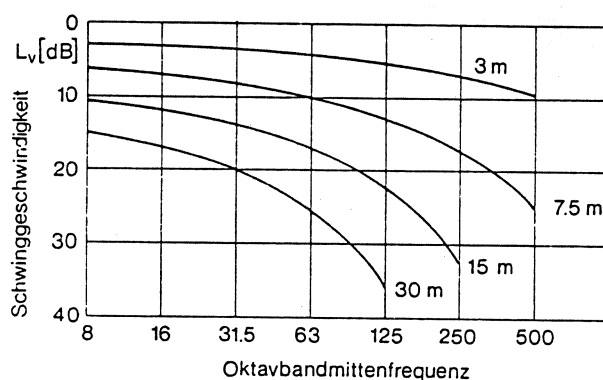


Fig. 2.16, Pegelabnahme in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz [2].

Mit Ausnahme der direkten Koppelung an die Quelle, wo der gesamte Frequenzbereich wirksam ist, sind bereits nach wenigen Metern der Ausbreitung im Boden Frequenzen > 125 Hz kaum mehr feststellbar.

• **Schwingungsübertragungsbrücken:**

Neben dem Boden können spezielle Übertragungsbrücken die Ursache für Erschütterungs- und Körperschallprobleme sein. Besonders in dichtbebauten, innerstädtischen Zonen muss untersucht werden, ob zwischen Quelle und Empfänger keine Verbindung besteht, welche als Wellenleiter die Übertragung begünstigen und dadurch vor allem Körperschallprobleme akzentuieren. Als Übertragungsbrücken sind beispielsweise Erdanker, starre Einführungen von Leitungen, Pfähle, starre Fahrbahnplatten, Injektionskörper u.ä. denkbar.

massgebender Faktor	Ausbreitungsverluste		
	gering	mittel	hoch
Distanz Quelle - Empfänger:			
• Punktquelle			X
• Linienquelle	X		
Bodenart:			
• trockene Lockergesteinsböden			X
• wassergesättigte Böden		X	
• kompakter Fels	X		
• Ton, Lehm		X	X
• Sand, Kies			X
• Lagerungsdichte		X	
		hoch	
		niedrig	
• Bodeninjektionen	X	X	X
Schichtung:			
• Ausbreitung quer zur Schichtung			X
• Ausbreitung längs zur Schichtung	X		
Grundwasserspiegel:			
• Quelle und Empfänger im GW	X		
Wellentyp:			
• P-Wellen			X
• S-Wellen			X
• R-Wellen		X	
Frequenz der Anregung:			
• tiefe Frequenz	X		
• hohe Frequenz			X
• breitbandig			X
• schmalbandig tieffrequent	X		
Schwingungsbrücken:			
• Quelle und Empfänger in harten Schichten (Fels, zB. Liasbänke) eingebunden	X		

Tab. 2.5, Charakterisierung und Wertung der Erschütterungsausbreitung im Boden.

Lockerboden:

Bei mehrstöckigen Gebäuden kann es beim Übergang in das Fundament bei tieffrequenter Anregung eventuell zu Schwingungsverstärkungen kommen. Höhere Frequenzanteile werden aber in der Regel stark abgemindert. Die Schwingungsübertragung in Gebäude mit grosser Masse und Steifigkeit auf Böden mit kleiner Bodensteifigkeit ist besonders gering.

Die folgende Tabelle versucht, den Einfluss der Frequenz auf das Schwingverhalten in stark verallgemeinerter Form darzustellen. Typische Anregungsfrequenzbereiche sind mit den infolge charakteristischen Eigenfrequenzbereiche massgebenden Bauteile in Bezug gestellt.

Frequenzbereich	0 bis 5 Hz		5 bis 10 Hz	10 bis 80 Hz	> 80 Hz
Erschütterungsquellen vgl auch Kap. 2.3 'Quellen'	Motoren und Installationen				
	Erdbeben				
	Verkehr				
	Sprengungen				
Bereich von Gebäudeeigenfrequenzen	ganzes Gebäude			Wände und Decken quer zur Mittelachse	Wände und Decken parallel zur Mittelachse
	Hochbauten	niedrige Bauten			
Schwingungsform	Das Haus führt als Ganzes Scher- und Biegeschwingungen aus		Kombinationen	Wände und Decken führen Biege- und Dehnungsschwingungen aus	

Tab. 2.6, Einfluss der Frequenz auf das Schwingverhalten und typische Frequenzbereiche

2.4.4 Koppelung Boden - Bauwerk

Die Schwingantworten verschiedener Punkte im Gebäude auf die entsprechenden Erregerkräfte werden von mehreren Faktoren beeinflusst. In der Hauptsache sind dies:

- Anregungsfrequenz
- Steifigkeit des Bodens
- Steifigkeit des Gebäudes und einzelner Bauteile
- Masse des Gebäudes inkl. Fundament
- Dämpfungswerte des Gebäudes

Die Schwingungsübertragung hängt im wesentlichen vom Eigenschwingverhalten des Gebäudes und dessen Bauteile ab. Gewöhnlich werden Schwingungen beim Übergang in ein Gebäude deutlich abgemindert, liegt die Anregung jedoch im Bereich von Resonanzfrequenzen, können sich diese verstärkt bemerkbar machen.

Grundsätzlich gelten dieselben Überlegungen, wie sie bereits in Kap. 2.4.2 'Koppelung Quelle - Boden' erläutert wurden. Die wesentlichen Schwingungseigenschaften bei der Übertragung Boden - Bauwerk lassen sich in vielen Fällen ebenfalls mit einem einfachen vertikal schwingendem Einmassen-System, welches auf den Baugrund repräsentierenden Federn und Dämpfern aufgelagert ist, erfassen.

Bei Erschütterungsanregung von Gebäuden kommen - im Gegensatz zu Erdbebenbelastungen - den Vertikalschwingungen aus verschiedenen Gründen - Deckenresonanzen, phasenverschiedene Anregung über den Gebäudegrundriss, Rayleighwellencharakteristik - grössere Bedeutung als den Horizontalschwingungen zu. Hinzukommt, dass die Horizontalamplituden infolge der gewöhnlich tiefen Horizontaleigenfrequenzen von Gebäuden stark reduziert werden und deutlich kleiner als die Vertikalamplituden sind.

Aufgrund dieser Modellvorstellung lassen sich für die Charakterisierung der Koppelung Boden-Bauwerk folgende zwei Fälle unterscheiden:

starre Unterlage, sehr steifer Untergrund, Fels:

Die Schwingungen werden beim Übergang in das Fundament nicht oder nur wenig reduziert, bei niedrigen steifen Gebäuden können diese sogar verstärkt werden. Massgebend sind in der Regel die Gebäude- und Bauteileigenfrequenzen. Fällt das Frequenzspektrum der Anregung mit Bauteileigenfrequenzen zusammen, so treten starke Resonanzüberhöhungen auf, die mit aufsteigender Stockwerkzahl zunehmen. Die grössten Verschiebungsamplituden treten bei weichen Gebäuden auf (Stahlskelettbauwerke, Mauerwerkgebäude, Holzdecken). Die Stärke der Resonanzverstärkung ist abhängig vom Dämpfungsmass der Bauteile.

2.5. Empfänger

2.5.1. Einleitung

Der zeitliche Verlauf der dynamischen Lasten hängt einerseits von der Art der Einwirkung, bzw. der Quellenverhältnisse, andererseits auch vom Schwingungsverhalten des Empfängers ab. Die Erschütterungsauswirkungen ist massgeblich von der Empfindlichkeit des Empfängers gegenüber dynamischen Beanspruchungen abhängig. Aufgrund des Schwingungsverhalten und der Empfindlichkeit können grundsätzlich drei verschiedene Empfängertypen, **Bauwerke, Geräte und Anlagen, sowie Menschen** unterschieden werden. Die Erschütterungsempfindlichkeit wird je nach Empfängertyp von unterschiedlichen Faktoren bestimmt.

Kriterium für Probleme im Zusammenhang mit Erschütterungen können **Schäden, Störungen** oder **Belästigungen** sein (Fig. 2.17). Bei Bauwerken sind Schäden das massgebende Kriterium, bei schwingungsempfindlichen Geräten und Anlagen hingegen müssen in der Regel Störungen in der Produktion oder bei der Funktion vermieden werden. Am empfindlichsten auf Erschütterungen reagiert der Mensch. Bei Personen kann durch Erschütterungen das Wohlbefinden beeinträchtigt werden, bei stärkeren und langandauernden Schwingungen sind Leistungsminderungen zu beobachten oder sogar gesundheitliche Schäden feststellbar. In der Folge wird einfach von Belästigung gesprochen. Es ist bekannt, dass Menschen Erschütterungen gewöhnlich überbewerten und infolge der Schwingungsbelastung Schäden an Bauwerken befürchten, lange bevor solche auftreten können. Oft wird im Zusammenhang mit der Immissionsbelastung von Personen die **Beschwerde** als Kriterium gewählt. Es ist zu beachten, dass nicht jede Belästigung auch bei jedem Menschen gleichermassen zu einer Beschwerde führt. Dafür sind wieder gewisse Faktoren - soziale Stellung, ökonomische Verhältnisse, etc. - massgebend. Die Beschwerde als Mass für die Beurteilung von Erschütterungsbelastungen des Menschen, darf nicht einziges Kriterium sein !

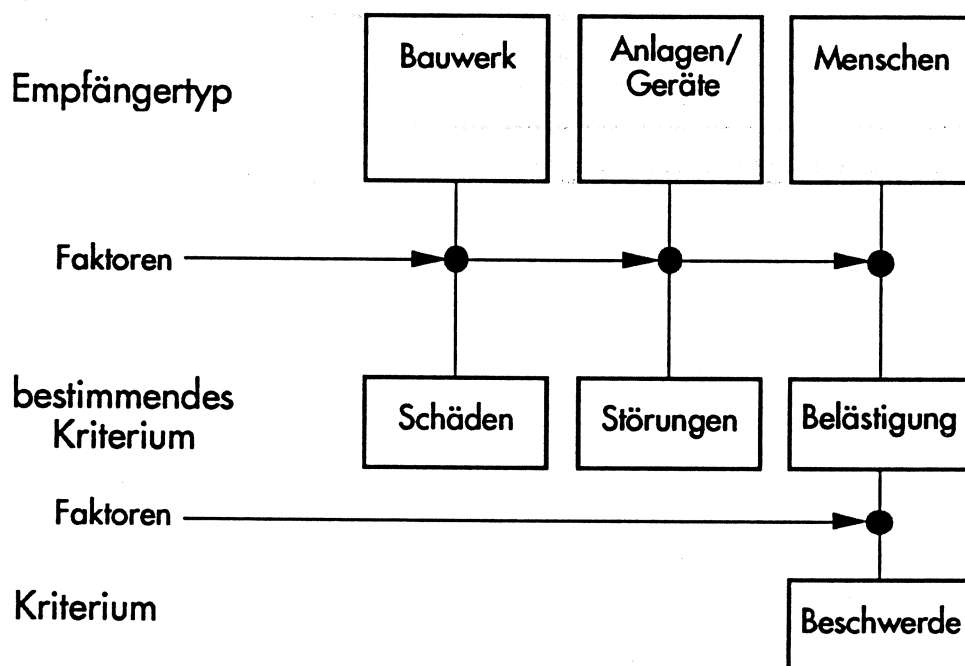


Fig. 2.17, Empfängertypen und Kriterien

2.5.2. Bauwerke

An Bauwerken sind infolge Erschütterungen in erster Linie Schäden zu verhindern. Beschädigungen können Auswirkungen auf die Gebrauchstauglichkeit und auf die Tragfähigkeit haben. Typische Schäden infolge Erschütterungen entstehen vor allem an sekundären Bauteilen, die Tragstruktur ist nur in extrem seltenen Fällen gefährdet. Schäden entstehen vorwiegend durch Wertverminderungen infolge ästhetischer Mängel.

Die folgende Tabelle erlaubt einen Überblick möglicher Schäden infolge Vibrationen.

Auswirkungen auf die Gebrauchstauglichkeit (bei üblichen Erschütterungen)	Auswirkungen auf die Tragfähigkeit (nur bei sehr starken Erschütterungen)
• Risse im Mörtel und Verputz • Risse in Zwischenwänden und Fassaden • Risse auf Keramikplatten • Springen von Glasflächen • Lösen und Versagen von Befestigungen	• Ermüdungsprobleme • lokale Plastifizierungen • Veränderungen der Materialeigenschaften bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten • Lösen und Versagen von Befestigungen (Schrauben, Keile ...), u.a. während Bauzuständen bei Gerüsten o.ä.

Tab. 2.7, Auswirkungen auf Bauwerke infolge Erschütterungen

Ursache von Schäden:

Die durch den Untergrund übertragenen Erschütterungen regen schwingungsfähige Bauteile, wie Decken, Böden, Wände, Stützen und Balken zu Schwingungen an. Die dadurch entstehenden dynamischen Spannungen aus Trägheits- und Dämpfungsanteilen werden den vorhandenen statischen Spannungen überlagert. Meist sind dynamische Spannungen nur Auslöser von Schäden. Häufige Lastwechsel können auch Einbussen der Festigkeitswerte infolge Ermüdung zur Folge haben.

Gewöhnlich sind die dynamischen im Vergleich zu den statischen Lastanteilen vernachlässigbar. Gefährdet sind Bauwerke vor allem bei Schwingungsverstärkungen infolge Resonanzen. Die Weiterleitung der Fundamentalschwingungen auf einzelne Bauteile hängt vom Frequenzverhältnis der Bauteileigenfrequenzen zur Frequenz der Fusspunktanregung ab. Liegen einzelne Frequenzanteile der Anregung in der Nähe von Eigenfrequenzen des Bauwerks oder einzelner Bauteile, so können bereits kleine Störkräfte grosse Schwingungsamplituden verursachen, welche wiederum zu Schäden führen können. Normalerweise ist allein die Grundeigenfrequenz des Empfängers massgebend. Typische Eigenfrequenzen von Bauwerken (v.a. Decken) liegen zwischen 7 bis 30 Hz, können aber je nach Situation auch bis 60 Hz oder unter 7 Hz sein. Bei tiefen Frequenzen treten besonders tiefe Dämpfungswerte auf, weshalb bei Erregerfrequenzen in diesem Bereich besondere Vorsicht geboten ist.

In der Regel treten die grössten Schwingungen bei den Geschossdecken auf. Mit zunehmender Geschosshöhe ist gewöhnlich eine Zunahme der Schwingstärke feststellbar. Die grössten Schwinggeschwindigkeiten treten bei Bauteilen kleiner Steifigkeit auf. Bei Resonanzerscheinungen werden vor allem Konstruktionen mit weichen Bauteilen, wie zB. Gebäude mit Holzdecken, Stahlskelettbauten, u.ä., bzw. deren Bewohner stärker angeregt als bei steifen Massivbauten.

Neben der Gefährdung eines Bauwerkes durch die direkt einwirkende Schwingung besteht eine weitere indirekte Gefährdung: Durch Vibrationen können Setzungen des Untergrundes hervorgerufen werden, welche ihrerseits die Ursache für beträchtliche Bauwerkschäden sein können. Eine Vielzahl von Bauwerksschäden infol-

ge Erschütterungen ist auf solche plastischen Effekte (sekundäre Erschütterungsschäden) zurückzuführen.

Charakterisierung der Empfindlichkeit

Die massgebenden Faktoren für die Schadensempfindlichkeit der Bauteile sind:

- Bauwerkstyp (Konstruktionsart und Foundation)
- Art des Baumaterials
- Ausführungsqualität
- Bauwerkzustand (Alter)

Die Schweizer Norm SN 640 312 a enthält unter anderem Richtlinien für die Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke. Es werden vier Empfindlichkeitsklassen unterschieden. Die folgende Tabelle lehnt sich an diese Norm an und erlaubt eine erste Wertung der Empfindlichkeit in Bezug auf die obengenannten Faktoren.

Einflussfaktoren	Schadensrisiko / Empfindlichkeit	
	kleiner	grösser
Bauwerkstyp • Konstruktion • Fundationsart	steife Massivbauten, einstöckige Gebäude Streifen-, Plattenfundamente, Pfähle	weiche Stahlskelettbauten, mehrstöckige Gebäude, Riegelbauten, Holz- und Hourdisdecken, Zwischendecken und Fahrbahn- decken, Mauerwerk Einzelfundamente
Baumaterial • Allgemein • Mörtel, Verputz • Bauteile	Zement	spröde Materialien geringer Zug- festigkeit, Kalk, Gips Ziegel, Keramik, Glas
Ausführungsqualität	Bauwerke nach den allgemeinen Regeln der Baukunst gebaut und sachgerecht unterhalten	
Bauwerkzustand • Alter		historische und geschützte Bau- werke (zB. Fresken, Wandmale- reien) frisch renovierte Bauten frisch betonierte Bauten, bzw. noch nicht voll hydratisierte Be- tonbauteile

Tab. 2.8, Bewertung der Empfindlichkeit auf Schäden infolge Erschütterungseinwirkung

2.5.3 Anlagen/Geräte

Erschütterungen können bei empfindlichen Geräten oder Einrichtungen Störungen verursachen. Bezüglich Schwingungsverhalten und Empfindlichkeiten können infolge der Vielfalt von Geräte- und Anlagentypen nur einige allgemeine Angaben gemacht werden. Dies trifft aus gleichen Gründen auch auf Normen und die übrige Literatur zu.

Schwingungen können folgende Auswirkungen auf Geräte und Anlagen haben:

- produktionstechnische Probleme bei den von der Maschine hergestellten Erzeugnissen (z.B. Toleranzprobleme bei Drehbänken)
- Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit (z.B. Messungenauigkeiten bei empfindlichen Messgeräten)
- Materialtechnische Probleme an der Maschine selbst (z.B. Lager, Wellen)

Ursachen von Störungen:

Ursache von Störungen bei Geräten und Anlagen sind immer mechanische Teile, welche zu unzulässigen Schwingungen angeregt werden. Die folgende Tabelle beschreibt einige typische Geräte mit den dazugehörigen empfindlichen Bauteilen:

Gerät/Anlage	empfindliche Bauteile	Problempunkte
• Allgemein • Computer	mechanische Teile Laufwerke, Plattenspeicher (Harddisk)	werden zu unzulässigen Schwingungen angeregt Aufzeichnungsfehler
• Präzisionsmaschinen	Schneid-, Fräsköpfe u.ä.	Produktionsungenauigkeiten
• Mikroskope	empfindliche, optische Geräteteile	Messstörungen
• Messgeräte Präzisionswaagen	empfindliche Aufnehmer	Messstörungen
• elektrische Relais	Schaltkontakte	Fehlschaltungen
• Sicherheitsanlagen (z.B. Banken)	Erschütterungssensoren	Fehlalarme

Tab. 2.9, Erschütterungsempfindliche Geräte und Anlagen

Charakterisierung der Empfindlichkeit:

Die massgebenden Faktoren für die Beurteilung sind:

- Geräte-/Anlagentyp
- zulässige Toleranzen/spezifische Empfindlichkeit
- Betriebszeit
- Standort

• **Gerätetyp,Anlagetyp:**

In einigen Normen wird versucht, die **Gerätetypen** in Empfindlichkeitsklassen einzuteilen und diesen Klassen Anhaltswerte zuzuordnen. Je nach Frequenzbereich ist entweder die maximale Schwinggeschwindigkeit oder die maximale Schwingbeschleunigung massgebend (Bachmann, Ammann; 'Schwingungsprobleme bei Bauwerken', 1987 [4]).

• **zulässige Toleranzen/spezifische Empfindlichkeit:**

Oft stehen Angaben über zulässige Toleranzen von Herstellern zur Verfügung. Erfahrungen aus ähnlichen Situationen können Anhaltswerte für die **Empfindlichkeit** vermitteln.

• **Betriebszeiten:**

Die Erfahrung zeigt, dass Erschütterungen nur bei im Einsatz stehenden Geräten zu Betriebsstörungen führen. Oft sind solche empfindlichen Geräte aber nur zeitweise im Einsatz (z.B. Präzisionsmessgeräte, Mikroskope). Für die Beurteilung von Massnahmen ist es deshalb sinnvoll, die **Betriebszeiten** störungsanfälliger Geräte vorgängig abzuklären.

• **Standort:**

Das Auftreten von Erschütterungen im Gebäude kann von Ort zu Ort unterschiedlich sein. Es ist deshalb wichtig, den genauen **Standort** des empfindlichen Gerätes zu kennen. Gleichzeitig ist zu kontrollieren, ob es sich um portable oder fix installierte Geräte handelt. Portable Geräte sind bereits so konstruiert, dass Erschütterungen kaum Schäden verursachen können. Geräte sind normalerweise durch elastische Lagerung gegen zu starke Vibrationen und Stösse geschützt. Es ist aber wichtig, die Art dieser Lagerung zu kennen, um Resonanzeffekte auszuschliessen.

Einflussfaktor	
Gerätetyp	• Einteilung in Empfindlichkeitsklassen
Empfindlichkeit	• vgl. Gerätetyp • Herstellerangaben • Produktionsanforderungen an die Genauigkeit • Messgenauigkeit • Erfahrungen aus ähnlichen Situationen
Betriebszeit	• temporär oder permanent
Standort	• Erschütterung im Gebäude unterschiedlich (eventuell Standort wechseln) • Gerät portabel oder fix • Art der Lagerung (Resonanzeffekte)

Tab. 2.10, Charakterisierung der Empfindlichkeit von Geräten

2.5.4 Mensch

Der Mensch reagiert sehr unterschiedlich auf mechanische Schwingungen. Im Unterschied zu den anderen Empfängertypen kommen beim Mensch neben rein physikalischen Grössen auch physiologische und psychologische Aspekte hinzu.

Erschütterungen können beim Menschen... das Wohlbefinden,
die Leistungsfähigkeit,
die Gesundheit

...beeinträchtigen. Diese drei Begriffe können nicht eindeutig definiert werden. Das Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG Umweltschutz 7.10.83) soll «...Menschen, Tiere und Pflanzen ... gegen schädliche und lästige Einwirkungen schützen ...». Als weitere Definition kann die Formulierung über die Funktion von Lärm- und Erschütterungsimmissionsgrenzwerten (Art 15) gelten: Darin heisst es, dass Immissionen unter den Grenzwerten «...die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören ...» soll.

Bei verkehrs- oder bauinduzierten Erschütterungen wird in der Regel das Wohlbefinden beeinträchtigt. Die Leistungsfähigkeit und die Gesundheit wird für die in dieser Arbeit behandelten Problemkreise kaum beeinflusst.

Ursache der Schwingungsempfindung:

Der Mensch kann Erschütterungen auf unterschiedliche Art und Weise wahrnehmen. Letztendlich sind die Ursachen immer schwingende Bauteile.

a) Wahrnehmen von Vibrationen (Fühlen)

Der Mensch besitzt ein sehr empfindliches Sensorium für Vibrationen. Er reagiert folglich sehr empfindlich auf Erschütterungen und überschätzt in der Regel die tatsächliche Schwingstärke.

Die Empfindung von Erschütterungen ist in erster Linie abhängig von der Frequenz, der Amplitude (Fig.2.18), der Richtung der Schwingung und der Schwingdauer.

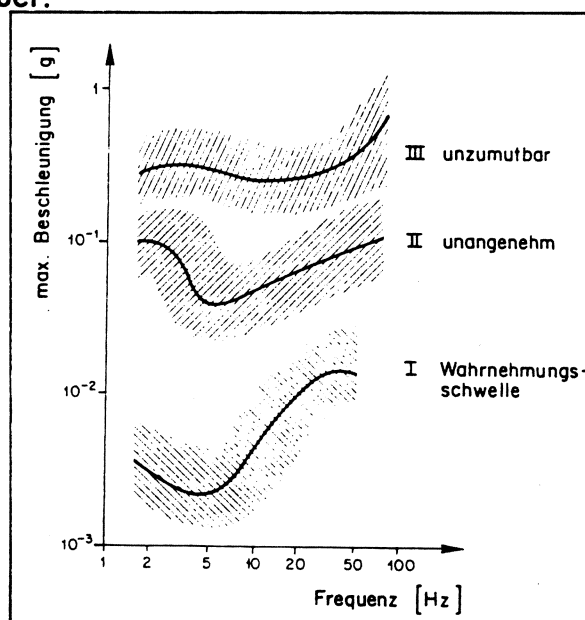


Fig 2.18, Wahrnehmungsbereiche von Vibrationen [4].

b) Abgestrahlter Körperschall (Hören)

Erschütterungen können beim Menschen auch indirekt zu Belästigungen führen. Höherfrequente Schwingungen können die Luft zu hörbarem Luftschall anregen, welcher sich z.B. durch das dumpfe Rumpeln im Zimmer infolge Vorbeifahrt eines Zuges äussert (vgl. Kap. 2.2.1, Seite 4). Abgestrahlter Körperschall wirkt v.a. unangenehm, weil er nicht lokalisierbar ist. Auch klirrende Fensterscheiben, rumplende Türen oder ähnliches können zu störenden Geräuschen führen. Die Hörbarkeitsgrenze ist abhängig von der Frequenz und der Schallintensität, Fig. 2.19 zeigt die Hörbarkeitsgrenze in Abhängigkeit der Schwinggeschwindigkeit und der Frequenz schwingender Membranflächen. Es können auch Schallresonanzen hinzukommen, welche die Vorhersage von Körperschallproblemen erschweren.

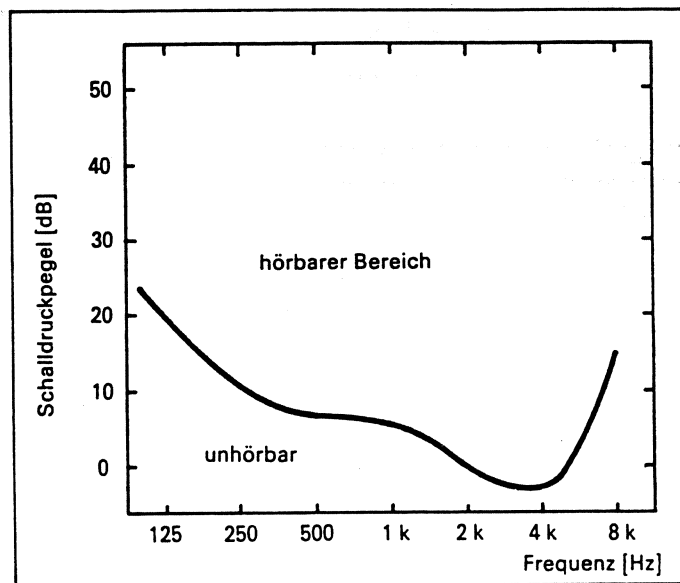


Fig. 2.19, Hörschwelle (SUVA Bericht, 'Gehörgefährdender Lärm am Arbeitsplatz' [5])

c) Sichtbare Schwingungen (Sehen)

Vibrationen können in einem Innenraum auch visuell erkennbar werden, wenn beispielsweise Gegenstände (Fenster, Spiegel, Lampen, Pflanzen, Bilder, etc.) zu Schwingungen angeregt werden.

Charakterisierung der Empfindlichkeit:

Die Bedingungen von Wohlbefinden sind wandelbar. Sie ändern je nach Alter und Lebensumständen, nach sozialem Umfeld und momentanen Absichten. In Fig. 2.20 wurde versucht, die verschiedenen Faktoren, welche die Wahrnehmung (Fühlen, Hören und Sehen) und Empfindung von Erschütterungen beeinflussen, darzustellen.

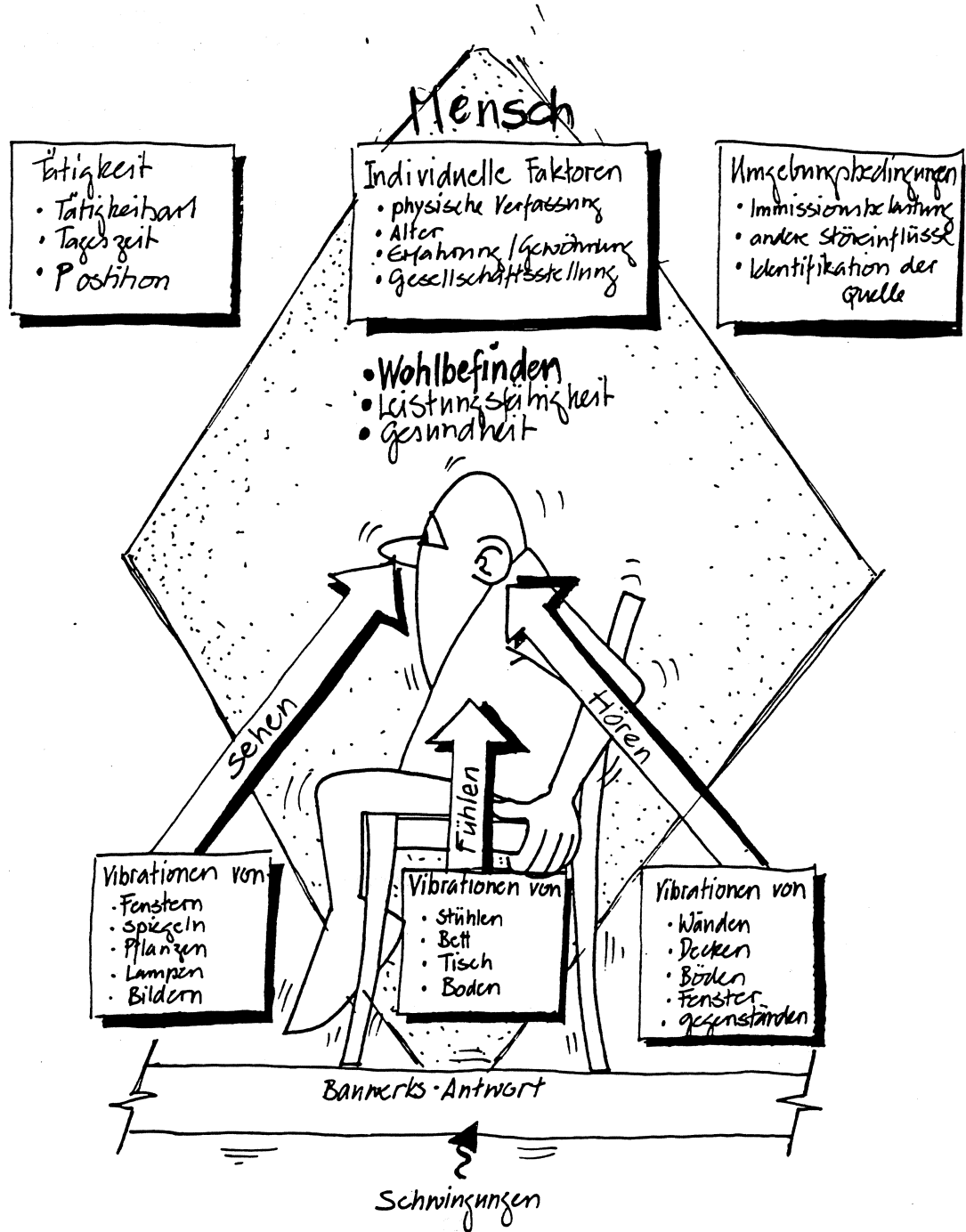


Fig. 2.20, Erschütterungseinwirkungen auf den Menschen und die massgebenden Einflussfaktoren

Die Empfindung der Erschütterungen hängt von zahlreichen subjektiven Parametern ab. Die massgebendsten Faktoren sind in Tab. 2.11 aufgelistet. Gleichzeitig wurde eine grobe Bewertung des Belästigungsrisiko gemacht.

massgebende Faktoren	Belästigungsrisiko	
	kleiner	grösser
Individuelle Charakteristiken • physische Verfassung • Alter • Erfahrung/Gewöhnung • Beziehung zur Quelle	gesund jung gewohnte Situation persönliche Beziehung/Bindung zur Erschütterungsquelle	krank alt aussergewöhnliche Erschütterungsereignisse zB. Sprengungen, Überraschungseffekt: keine Bindung zur Quelle
Umgebungsbedingungen • Immissionsbelastung • andere Störeinflüsse • Identifikation der Quelle	Industriegebiet, ländliche Region nur Vibrationen Quelle bekannt	städtische Wohngebiete Lärm, Abgase, u.a. Quelle unbekannt
Tätigkeit • Tätigkeitsart • Tageszeit	manuelle Arbeit Tag	geistige Arbeit, künstlerische Tätigkeit / Ruhe Spital, Schule Nacht, Mittagszeit

Tab.2.11, Charakterisierung und Wertung der Erschütterungseinwirkung auf Menschen.

2.6 Liste der massgebenden charakterisierenden Faktoren

Als Grundlage für die Vorhersage und Beurteilung der Erschütterungsausbreitung sowie als Grundlage für die Wahl und Dimensionierung von Reduktionsmassnahmen ist die Kenntnis aller charakteristischen Faktoren, welche das Erschütterungsbild massgebend beeinflussen, erforderlich.

In der folgenden Darstellung (Fig. 2.21) sind die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse in einer Art Checkliste zusammengestellt.

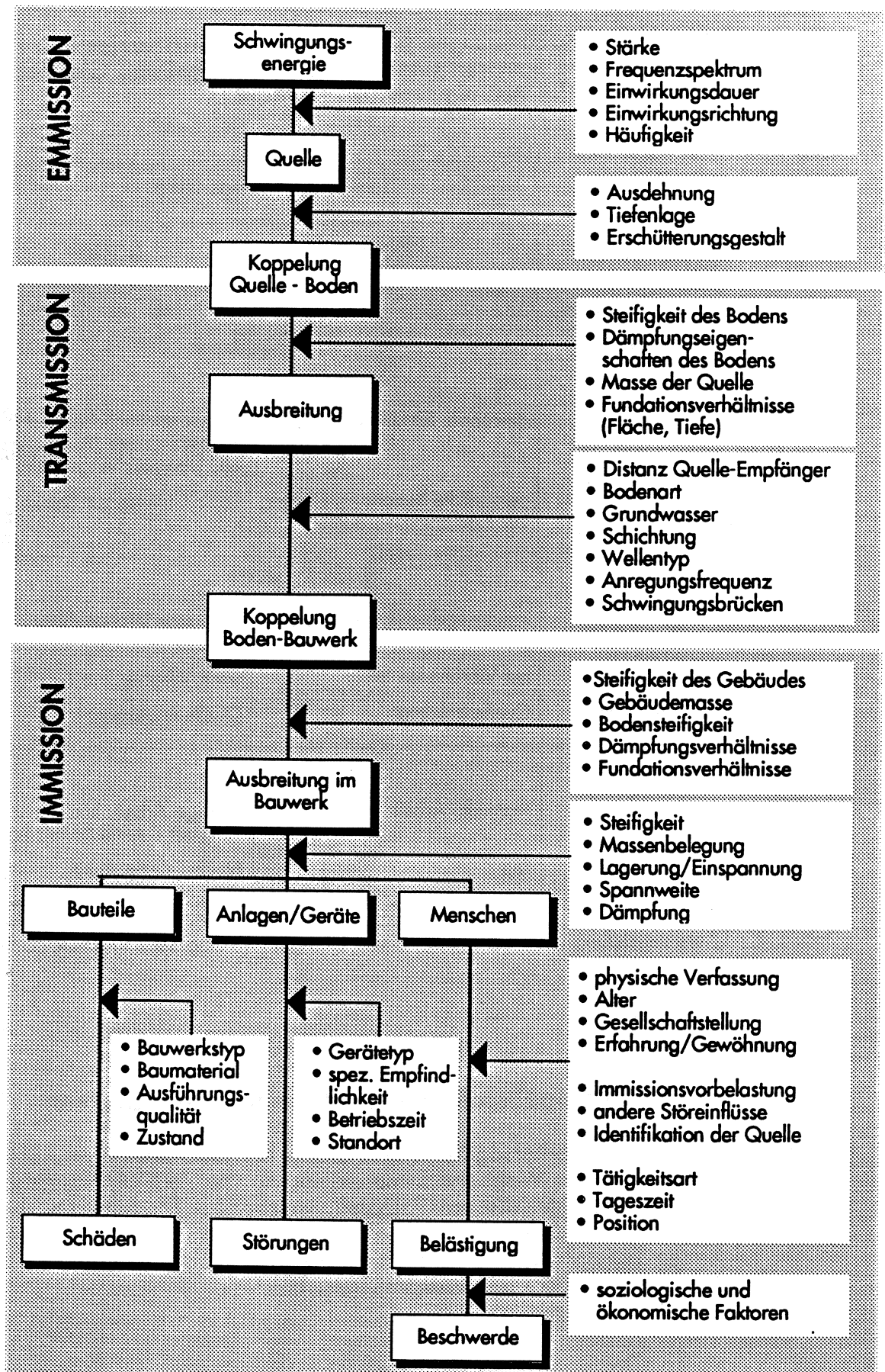


Fig. 2.21, Checkliste der charakteristischen Faktoren

3. Vorhersagen und Messungen

3.1 Methoden zur Bestimmung der Erschütterungsausbreitung

Für die Bestimmung der Erschütterungsausbreitung stehen grundsätzlich folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

	Mittel/Methode	Voraussetzung/ Einschränkung	Bemerkung zu den Ergebnissen
1	Numerische Verfahren (zB. Diskretisierung mit linearen FE-Pro- grammen)	• linear-elast. Stoffge- setze (vgl. Seite 31) • genaue Kenntnisse der dynamischen Kennziffern und der geometrischen Randbedingungen erforderlich • genaue Kenntnisse der Boden- und Bau- werksstrukturen	• Aufwand gross • genaue Modellierung auch komplizier- ter, geometrischen Situationen mög- lich • gute Resultate und Absolutaussagen möglich, aber Problem der umfassen- den Erfassung der dyn. Kennziffern und der geometr.- geologischen Rand- bedingungen • geeignet für wissenschaftliche Para- meteruntersuchungen
2	Analytische Modellbe- rechnung mit Masse-Fe- der-Systemen, Stab- werkssystemen mit Punktemassen, etc.	• theoretische Pro- blemlösung • meist starke Vereinfachung der Wirk- lichkeit notwendig	• klares, eindeutiges Modell • exakte mathematische Aussagen (quantitativ) • geeignet für die Untersuchung des grundsätzlichen dynamischen Verhal- tens von Einzelsystemen (zB. Koppe- lung Boden-Bauwerk) • theoretische Resultate
3	Semiempirische Formeln aufgrund phänomenologi- scher Gesetzmässigkeit- en	• Erfahrung • die massgebenden charakterisierenden Faktoren	• Aufwand relativ klein • v.a. qualitative Aussagen • Ausgrenzungsverfahren und Sensiti- vitätsanalysen • empfohlen für Erschütterungsproble- me in der Praxis
4	Messungen	• nur effektiv vorhan- dene Erschütterungs- situationen bestimm- bar	• alle Einflüsse implizit enthalten • genaue quantitative, auch Absolut- aussagen • beschränkte Prognosemöglichkeiten (Übertragbarkeit) • gut kombinierbar mit Methode 3

Tab. 3.1, Methoden zur Ausbreitungsbestimmung.

3.2 Vorhersage

Messungen sind nicht oder nur teilweise geeignet, die Erschütterungs- oder Körperschallbelastung zu prognostizieren. Für Vorhersagen müssen Modellberechnungen herangezogen werden. Als Grundlage für eine Prognose haben sich vor allem phänomenologische Betrachtungsweisen mit semiempirischen Ansätzen und Abschätzungen bewährt. Aufgrund der Analyse kann die Erschütterungsausbreitung in Einzelvorgänge unterteilt werden und die jeweiligen massgebenden Faktoren charakterisiert werden. Die Erschütterungen können nun mit Hilfe von Faktoren, welche die verschiedenen Einflüsse berücksichtigen, abgeschätzt werden. Analog ist auch die Prognose des abgestrahlten Körperschalls möglich. Die Amplitudenveränderungen lassen sich in dem Fall durch Pegel Zu- oder Abschläge angeben (vgl. Fig. 3.1). Solche empirischen Ausbreitungsmodelle wurden vor allem für Verkehrserschütterungen aufgestellt, für Bauerschütterungen sind sie eher ungeeignet.

Solche semiempirische Abschätzungen müssen in der Regel Sensitivitätsanalysen beinhalten, indem die wahrscheinlichste, die denkbar ungünstigste und die günstigste Konstellation untersucht wird. Einen Hinweis gibt [2] und die folgende Darstellung.

Vergleiche dazu Fig. 3.1 folgende Seite:

In Schwinggeschwindigkeiten v in [mm/s]:

(Q_i := Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung der Verluste)

$$v_i = (Q_{\text{geom}} \cdot Q_{\text{mat}} \cdot Q_{\text{schicht}} \cdot Q_{\text{wasser}} \cdot Q_{\text{freq}} \cdot Q_{\text{kopp}} \cdot Q_{\text{empf}}) \cdot v_E$$

In Pegelschreibweise $L_{v,i}$ in [dBv] oder [dBA]:

($\Delta L_{v,i}$:= Zu- und Abschläge zur Berücksichtigung der Verluste)

$$L_{v,i} = L_{v,E} - \Delta L_{v,\text{geom}} - \Delta L_{v,\text{mat}} - \Delta L_{v,\text{schicht}} - \Delta L_{v,\text{wasser}} - \Delta L_{v,\text{freq}} - \Delta L_{v,\text{kopp}} - \Delta L_{v,\text{empf}}$$

wobei:

$v_i/L_{v,i}$:	Erschütterung am Emissionsort (Quelle)
$v_E/L_{v,E}$:	Erschütterung am Immissionsort (Empfänger)
$Q_{\text{geom}}/\Delta L_{v,\text{geom}}$:	Amplitudenreduktion infolge geometrischer Dämpfung
$Q_{\text{mat}}/\Delta L_{v,\text{mat}}$:	Amplitudenreduktion infolge Materialdämpfung
$Q_{\text{schicht}}/\Delta L_{v,\text{schicht}}$:	Amplitudenreduktion infolge Reflexionen u.ä (Schichtung)
$Q_{\text{wasser}}/\Delta L_{v,\text{wasser}}$:	Amplitudenreduktion infolge Einfluss des Wasser
$Q_{\text{freq}}/\Delta L_{v,\text{freq}}$:	Amplitudenreduktion infolge frequenzabhängigem Ausbreitungsverhalten
$Q_{\text{kopp}}/\Delta L_{v,\text{kopp}}$:	Amplitudenreduktion infolge Koppelungsverlusten
$Q_{\text{empf}}/\Delta L_{v,\text{empf}}$:	Amplitudenveränderung beim Empfänger

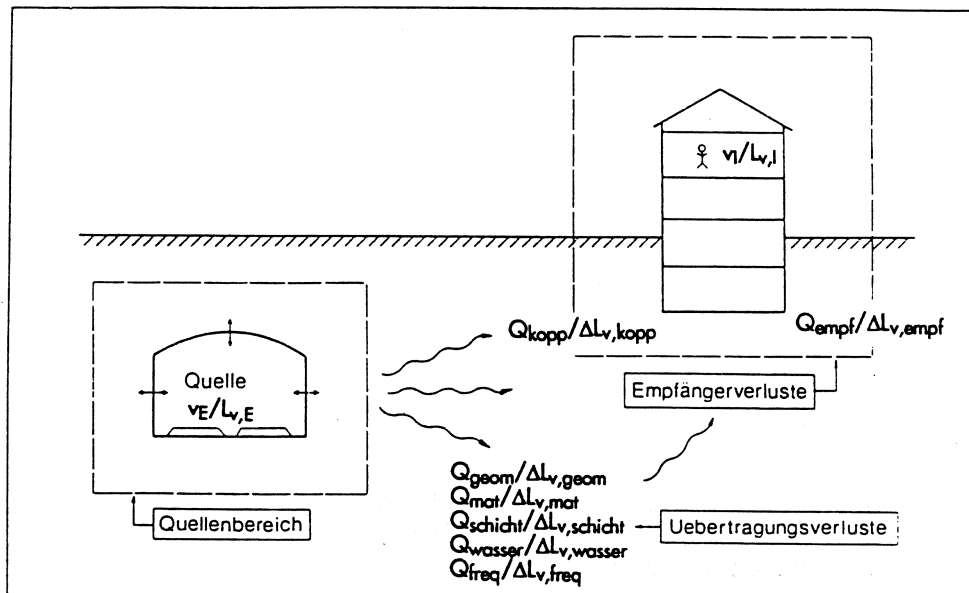


Fig. 3.1, Abschätzungen mit Hilfe semiempirischer Formeln

3.3 Erschütterungs- und (Körper-)Schallmessungen

Messungen sind ein zentraler Bestandteil der Erschütterungsanalyse. Objektive und quantitativ genaue Aussagen über das Ausbreitungsverhalten lassen sich zuverlässig nur damit gewinnen, wobei nur bereits bestehende Immissionen erfasst werden können.

Für **Schwingungsmessungen** stehen keine einheitlich normierten Messeinheiten (Geräte) zur Verfügung. Es bestehen aber einige Normen mit Hinweisen zu messtechnischen Fragen (vgl. Normen SN 640 312 a / DIN 45 664 / DIN 4150 2/10.91). Die Wahl der Messorte, die richtige Ankoppelung der Aufnehmer, die Wahl der Vorverstärkung und die Kalibrierung bedürfen grosser Erfahrung. Aus diesem Grunde sollten Erschütterungsmessungen ausschliesslich von erfahrenen Spezialisten durchgeführt werden.

Für die objektive Beurteilung der Körperschallbelastung müssen **Luftschallmessungen** durchgeführt werden. Im Gegensatz zur Erschütterungsmessung bestehen für **Lärm-messungen** internationale Normen, welche die Eigenschaften der Messgeräte und die Messmethoden festlegen (vgl. Lärmschutzverordnung Anhang 2).

Im Rahmen dieser Arbeit werden einige grundsätzliche Hinweise zur Technik der Erschütterungs- und Körperschallmessung gegeben. Der Leser ist somit in der Lage, die Bedeutung und die Anwendungsmöglichkeiten von Messungen bei Erschütterungsproblemen realistisch einzuschätzen, sowie die Qualität der Messung beurteilen zu können.

Elemente der Erschütterungs- und Körperschallmessgeräte:

Eine Messausrüstung zur vollständigen Analyse von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen umfasst im Minimum folgende Ausrüstungsteile:

Gerät	Anforderungen	Bemerkungen
• 2 einkanalige Schwinggeschwindigkeits- oder -beschleunigungsaufnehmer • 2 Messmikrofone • 1 Rauschgenerator ("rosa Rauschen") • 1 Verstärker • 1 Registriereinrichtung • Kalibriereinrichtung(en)	Frequenzbereich: min. 10 .. 500 Hz Messempfindlichkeit: min. 0.005 .. 50 mm/s Frequenzbereich: min. 20 .. 5000 Hz zur Erzeugung von breitbandigem Rauschen zur Signalverstärkung zur simultanen Aufzeichnung von mindestens 4 Messkanälen im Frequenzbereich 10..5000 Hz (Schall) bzw. 10..500 Hz (Erschütterungen)	Erschütterungen Körperschall Körperschall

Zusätzlich können noch folgende Geräte dienlich sein:

Gerät	Anforderungen	Bemerkungen
• Kontrollgeräte • A/D-Wandler • Auswertungsgeräte - Frequenzanalysator - Pegelschreiber - versch. Auswertungsfilter	Bildschirm (Oszilloskop analog oder digital) Datenbreite 12 bit, Abtastrate >1000 Ablesungen pro Sek. Frequenzbereich min. 10 .. 5000 Hz; vorzugsweise zweikanalig	

Tab. 3.2, Elemente der Erschütterungs- und Körperschallmessung

Messziele:

Erschütterungs- und Körperschallmessungen können folgende Ziele verfolgen:

- objektive Erfassung der auftretenden Schwinggrößen (Schwingweg, -geschwindigkeit oder -beschleunigung)
- Aussagen über das Eigenschwingverhalten des Messobjektes (vor allem Eigenfrequenzen f_n und Dämpfungswerte ξ)
- Bestimmen von Übertragungsfunktionen durch künstliche Anregung (Schwingerversuche und Probesprengungen, Seite 77)
- objektive Erfassung der Lärmimmissionen (Schalldruckpegel)

Messgrößen:

Erschütterungen werden erfasst durch Messen des Schwingweges, der Schwinggeschwindigkeit oder der Schwingbeschleunigung. In der Praxis wird für gewöhnlich eine kinematische Grösse, also die Geschwindigkeit oder Beschleunigung gemessen. Durch Integration oder Differentiation kann theoretisch jede Messgrösse in die andere umgewandelt werden, praktisch ist gewöhnlich - dank ihrer glättenden Eigenschaft - nur die Integration. Bei der Messung der charakterisierenden Schwinggrößen sind grundsätzlich drei zueinander senkrecht stehende Schwingkomponenten zu messen, wobei in vielen Fällen allein die Vertikalkomponente massgebend ist.

Für Körperschallmessungen wird analog zu Lärmimmissionsmessungen der Schallintensitätspegel oder meistens der Schalldruckpegel [dBA] aufgezeichnet.

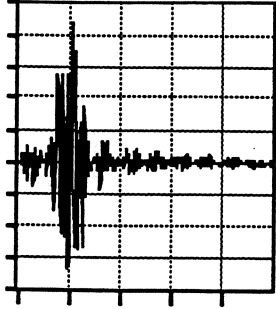
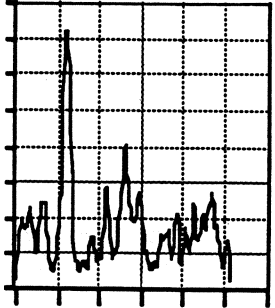
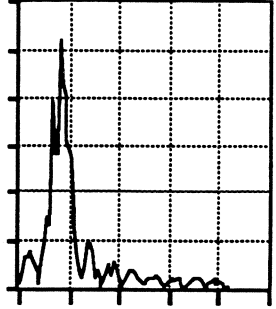
praktische Hinweise zur Durchführung von Messungen:

mögliche Messanordnung für Immissionsmessungen bezüglich Störung des Menschen:

- 1 vertikaler Schwingaufnehmer am Gebäudefundament (an der Tragstruktur)
- 1 vertikaler Schwingaufnehmer in Fussbodenmitte des zu untersuchenden Raumes. Es muss die Schwingung des eigentlichen Fussbodens erfasst werden, d.h. der Aufnehmer kann sich auch auf schwimmenden Unterlagsböden o.ä. befinden (Spannteppiche o.ä. sind zu überbrücken).
- 1 Messmikrofon in Raummitte des zu untersuchenden Gebäuderaumes.
- Die Verwendung von mindestens zwei Schwingungsaufnehmer gleichzeitig erlaubt Aussagen über das Ausbreitungsverhalten der Gebäudestruktur zu machen.
- Jede Messposition/-stellung muss eine repräsentative Anzahl von Emissionseignissen (beispielsweise Zugsdurchfahrten für alle Zugskategorien) umfassen. Die Messungen müssen auf jeden Fall die kennzeichnenden Erschütterungs- und Körperschalleinwirkungen erfassen.
- Sämtliche Messsignale während der gesamten Messdauer müssen lückenlos auf Datenträger gespeichert werden, so dass eine wie auch immer geartete nachträgliche Auswertung jederzeit möglich ist.

Auswertung und Darstellung der Messergebnisse:

Als Darstellung der Messdaten haben sich Zeitverläufe (time history), Frequenzspektren und Pegelschriebe (Pegelzeit- und Pegelfrequenzschriebe möglich) durchgesetzt. Je nach gewählter Darstellung variiert der Informationsgehalt (vgl. Tab.3.3).

Bezeichnung	Zeitverlauf	Frequenzspektrum	Pegelschrieb
Darstellung	[mm/s]  [sec.]	[mm/s]  [Hz]	[dBv]  [sec.]
Beschreibung	Die charakterisierende Schwinggröße bei Erschütterungen oder Schalldruck bei Körperschall in Funktion der Zeit. Darstellung vor allem für Erschütterungen	Die charakterisierende Schwinggröße oder der Pegel in Funktion der Frequenz. Bandbreite und Auflösung muss angegeben werden. Durch Fourier-Transformation kann die Schwingung in ihre einzelnen harmonischen Schwinganteile aufgelöst werden.	Dezibel (dB) Werte: logarithmische Darstellung der interessierenden Größe im Verhältnis zu einer gleichartigen Bezugsgröße, welche immer bezeichnet werden sollte. Die Zeitkonstante bestimmt die Reaktion der Anzeige auf Pegeländerungen. (slow: 1 s, fast: 125ms, impulse: 35 ms, peak (Spitzenwert) 20 - 50 μs)
Information	- Spitzenwerte (Scheitelwerte) - Erschütterungsgestalt - Verlauf des Schallsignals - Bestimmung des Dämpfungsmasses	- Verteilung der Frequenzanteile - Bestimmung von Eigenfrequenzen und deren obere Harmonischen - Beurteilung von Resonanzstellen	- gute Darstellung des menschlichen Empfindens

Tab. 3.3, Möglichkeiten der Darstellung von Schwingungsmessungen

4. Beurteilung

4.1 Einleitung

In der Praxis stellt sich dem Ingenieur die Frage, ob die gemessenen oder prognostizierten Schwinggrössen zulässig oder bereits kritisch sind und somit Massnahmen zur Reduktion der Erschütterungen ergriffen werden müssen. Es sind deshalb entsprechende Grenz- beziehungsweise Anhaltswerte erforderlich. Der Ermessensspielraum bei der Festlegung solcher Anhaltswerte für Erschütterungseinwirkungen ist gross. Das kommt auch in den Unterschieden zwischen den Normen beziehungsweise Richtlinien verschiedener Länder zum Ausdruck. Grundlegende Aspekte und Probleme können darin verschieden beurteilt werden.

Dieses Kapitel beschränkt sich auf einige grundsätzliche Hinweise, wie Erschütterungs- und Körperschallimmissionen beurteilt werden können. Es ist nicht Ziel dieser Arbeit, umfassende Vorschläge für Beurteilungswerte zu machen.

4.2 Generelle Aspekte

Beurteilt werden Erschütterungen durch den Vergleich der vorhandenen Schwingungen mit den zulässigen Schwingungsgrössen. Hier entsteht bereits die Schwierigkeit, welche Schwingungsgrössen miteinander verglichen werden sollen. Es besteht die Möglichkeit, Schwingweg, -geschwindigkeit oder -beschleunigung zu messen. Zudem können an einem Punkt drei Komponenten oder nur eine Resultierende aufgezeichnet werden. Es wird oft zwischen Spitzenwerten und Mittelwerten unterschieden. Hinzukommt, dass die Empfindlichkeit der Empfänger in der Regel frequenzabhängig ist. Die relevante Beurteilungsgrösse sollte deshalb vorgängig festgelegt werden.

Die zulässigen Immissionswerte sind abhängig vom Empfängertyp. Je nach Empfänger spielen neben der Schwinggrösse und der Frequenz noch andere Faktoren eine Rolle, welche bei der Festlegung von Anhaltswerten berücksichtigt werden sollten. Der relevante Empfängertyp muss vor der Beurteilung feststehen.

4.3 Vorgehen

Vielfach lassen sich Erschütterungen bereits nach einer ersten Grobanalyse eindeutig als schädlich oder als unkritisch verifizieren. Zwischen diesen Grenzen bleibt eine mehr oder weniger breite, kritische Zone, die keine eindeutige Zuordnung, beziehungsweise Beurteilung zulässt. Dieses Vorgehen bei der Beurteilung wollen wir als Ausgrenzungsverfahren bezeichnen.

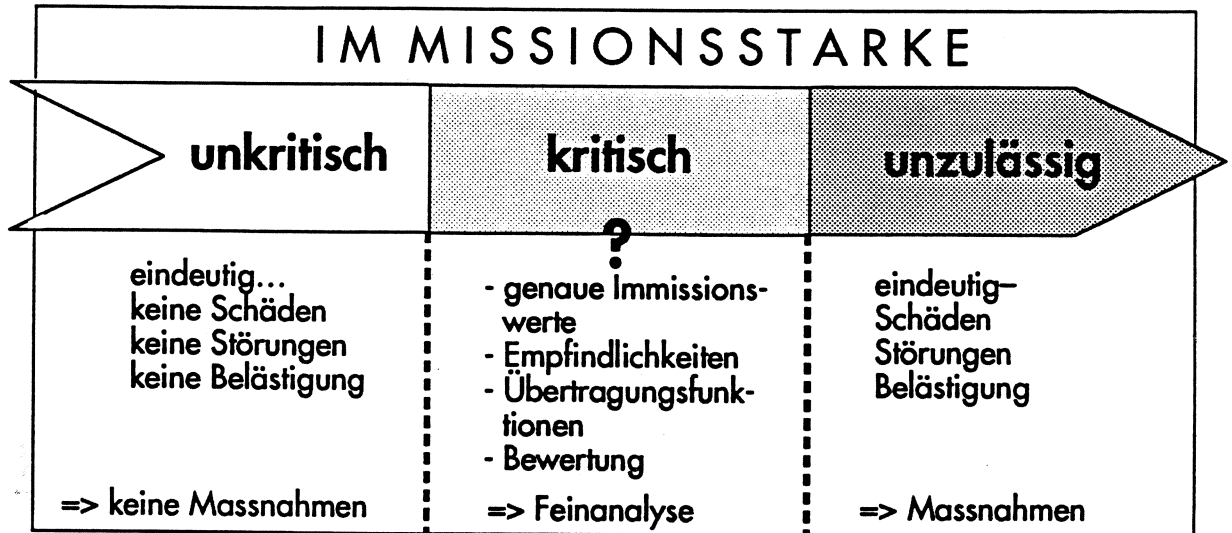


Fig. 4.1, Ausgrenzungsverfahren

Kann nach einer Grobanalyse die Erschütterungssituation nicht eindeutig als unkritisch oder unzulässig beurteilt werden, ist eine Feinanalyse durchzuführen, welche einerseits Erschütterungsmessungen, Ausbreitungsberechnungen und Modelluntersuchungen, andererseits Untersuchungen über die Schwingungsempfindlichkeit der massgebenden Empfänger umfassen kann.

Damit besteht die Möglichkeit, die tatsächlich auftretende Erschütterungsintensität genauer zu quantifizieren oder die Empfindlichkeiten beziehungsweise die Grenzen exakter anzugeben und somit den kritischen Bereich zu reduzieren. Ist eine eindeutige Zuordnung weiterhin nicht möglich, müssen Risikoüberlegungen (Auftretenswahrscheinlichkeit x Schaden) als Entscheidungsgrundlage miteinbezogen werden.

4.4. Beurteilungsgrössen

Die Messgrösse entspricht nicht unbedingt der Beurteilungsgrösse. Es empfiehlt sich, bei Erschütterungsmessungen Zeitverläufe der Schwinggeschwindigkeit oder Schwingbeschleunigung komponentenweise aufzuzeichnen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, bereits bei der Schwingungsaufnahme Signalauswertungen vorzunehmen, wobei dann Informationen verloren gehen.

Die Auswertung der Messgrössen liefert die gewünschten Beurteilungswerte, welche mit Anhaltswerten verglichen werden können. In den folgenden Tabellen sind die Beurteilungsgrössen verschiedener Normen und Richtlinien, unterschieden nach Empfängertyp, aufgeführt.

Allgemein lässt sich feststellen, dass für die Beurteilung von Einwirkungen auf Bauwerke die maximal resultierenden Schwinggeschwindigkeit und Einwirkungen auf Personen Effektivwerte der Schwingbeschleunigung, meist in vertikaler Richtung vergli-

chen werden. Alle Schwingungsgrößen werden frequenzabhängig dargestellt. Für Geräte und Maschinen bestehen weniger einheitliche Richtlinien. Sinnvoll scheint dort die Messung der maximalen Resultierenden der frequenzabhängigen Schwingbeschleunigung am Ort des Auflagers des betreffenden Gerätes.

Tab. 4.1, Beurteilungsgrößen verschiedener Normen im Vergleich

Bauwerke:

Normen	SN 640312 a: 1992	KDT 046/72: 1972	DIN 4150/3: 1983
Messgrößen	Zeitverlauf und Frequenz der Schwinggeschwindigkeit in 3 Komponenten	Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit	Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit
Messort	am Fundament bzw. Ort mit massgebende Auswirkung der Erschütterung		am Gebäudefundament
Beurteilungswert	maximale Resultierende der Schwinggeschwindigkeit		maximale Schwinggeschwindigkeit

Anlagen/Geräte:

Anlagen/Geräte	
Messgrößen	Zeitverläufe der Schwinggeschwindigkeit oder -beschleunigung
Messort	am Gerätestandort
Beurteilungswert	max. Schwinggeschwindigkeit oder -beschleunigung

Menschen:

Norm	ISO 2631: 1978/85	ANSI S.3.29: 1983	BS 6472: 1984	AFNOR E90- 401: 1977
Messgrößen	Zeitverlauf der Beschleunigungen	ungefilterter Zeitverlauf der Beschleunigung	Zeitverlauf der Beschleunigung (oder der Geschwindigkeit, bzw. Weg)	Beschleunigungsverlauf in 3 Richtungen nach den Achsen des menschl. Körpers
Messort	Einleitungsstelle der Schwingung in den Körper	Strukturoberfläche an der Berührungsstelle zum Körper	Strukturoberfläche im Gebäude	bei der Einleitungsstelle in den Körper
Beurteilungswert	Effektivwert der Beschleunigung (Terzbandweise) Berücksichtigung des Scheitelfaktors	Effektivwert der Beschleunigung (Terzbandweise)	Effektivwert der Beschleunigung	Effektivwert der Beschleunigung in 3 Richtungen (versch. gefiltert) Der Beurteilungswert ist die Wurzel der Summe der quadrierten Komponenten

Norm	DIN 4150/2: 1975	DIN 4150/2: Entwurf 10.90	VDI 2057: 1979
Messgrößen	Zeitverlauf von Schwingweg, -geschwindigkeit, -beschleunigung	das der Schwingschnelle proportionelle und bandbegrenzte Signal	Zeitverlauf von Schwingweg, -geschwindigkeit oder -beschleunigung
Messort	auf dem Fussboden, am Ort der stärksten Schwingung	auf dem Fussboden, am Ort der stärksten Schwingung	Einleitungsstelle in den menschlichen Körper bzw. Deckenmitte
Beurteilungswert	Scheitelwert des grössten Signals (x,y,z), KB-Wert	ausführliche Bewertung bis zu einem KB _R -Wert	bewertete Schwingstärke (Terzbandweise), Superposition der Terzbänder

4.5 Beurteilungskriterien

Es wurde bereits vorgeschlagen, aufgrund einer Grobanalyse die Erschütterungsproblematik durch Ausgrenzung anzugehen. Wenn keine eindeutige Zuordnung beziehungsweise Beurteilung möglich wird, ist eine Feinanalyse angebracht.

In den folgenden Abschnitten sind verschiedene Beurteilungskriterien für eine erste Grobanalyse in Form von qualitativen Aussagen und einigen Grafiken angegeben.

Beurteilungskriterien für die Grobanalyse:

In Tabelle 4.2 wurden die wichtigsten Kriterien aufgelistet. Um Massnahmen zur Erschütterungsreduktion ohne weitere Untersuchungen von vornherein auszuschliessen, müssen diese aufgeführten Kriterien entsprechend dem massgebenden Empfängertyp eindeutig erfüllt sein.

Empfängertyp	Kriterien
Bauwerke	• keine Schäden
Geräte/Anlagen	
	• keine Produktionsfehler • keine Funktionsstörungen • (keine Schäden)
Menschen	• Erschütterungen sollen nicht oder kaum wahrnehmbar sein • in der Nacht soll der (Körper)-Schall keine Schlafstörungen verursachen

Tab. 4.2, grundlegende Beurteilungskriterien

In den drei folgenden Tafeln sind für jeden Empfängertyp einige Anhaltswerte für die Grobanalyse angegeben.

Tafel 1, Bauwerke

Gebäudeschäden

Die in der Norm SN 640 312 a über Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke angegebenen Richtwerte beziehen sich auf Spitzenwerte des Schwinggeschwindigkeitsvektors, welche auf den Fundamentmauern gemessen werden. Vereinzelt Überschreitungen bis etwa 30 % werden noch als unkritisch beurteilt. Es wird unterschieden zwischen drei Häufigkeitsklassen und vier Empfindlichkeitsklassen der Gebäude. Probleme ergeben sich dort, wo starke Resonanzen von Geschossdecken auftreten. Für diesen Fall fehlen definierte Messmethoden und Richtwerte. Schäden infolge sekundären Setzungen infolge Bodenerschütterungen sind ebenfalls nicht Gegenstand dieser Norm. Als Vergleich sind Anhaltswerte der DIN 4150, Teil 3 und den Richtlinien KDT 046/72 (1972) der ehemaligen DDR aufgeführt.

SN 640 312 a: für normal empfindliche Gebäude:

- 1 — gelegentlich (Sprengungen, An- und Ausfahren von Vibrationsgeräten)
- 2 — häufig (häufige Sprengungen, Rammergeräte, Vibrationsgeräte, Abbauhämmer, Notstromgruppen)
- 3 — permanent (Verkehr, festinstallierte Maschinen, Abbauhämmer bei längerem Einsatz)

Für Gebäude mit erhöhter Empfindlichkeit liegen die Richtwerte zwischen den angegebenen Werten und der Hälfte davon, für sehr wenig empfindliche Gebäude können die Richtwerte bis auf das dreifache erhöht werden.

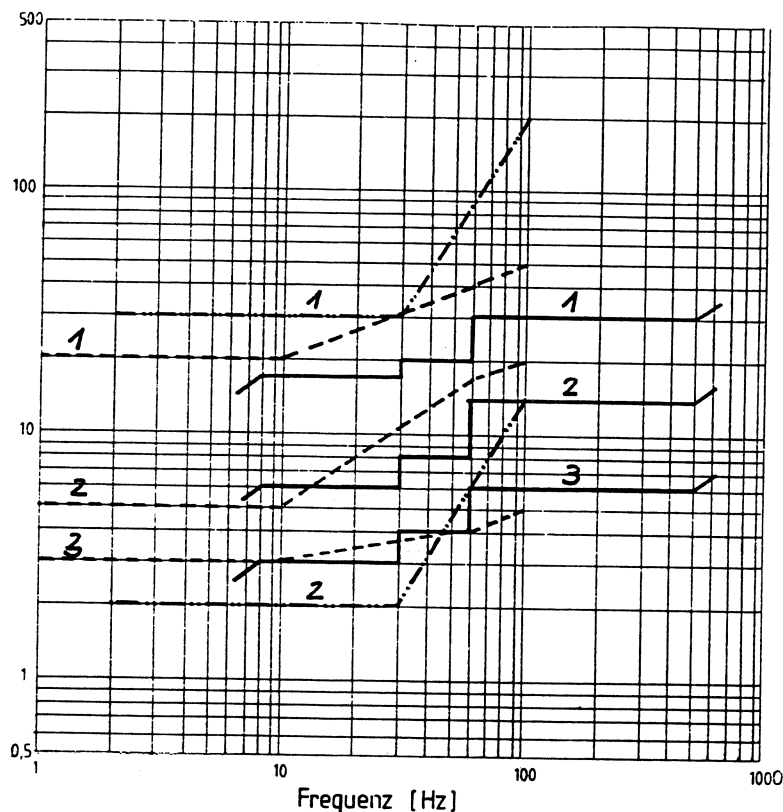
DIN 4150 Teil 3

KDT 046/72

- 1 ----- Industriebauten
- 2 ----- Wohnbauten
- 3 ----- erschütterungsempfindliche Gebäude

- 1 ----- Gebäudeklasse IV (wenig erschütterungsempfindlich)
- 2 ----- Gebäudeklasse I (Gebäude unter Denkmalschutz)

Geschwindigkeit [mm/s]



Tafel 2, Geräte/Anlagen

Störungen

Angaben von Anhaltswerten für Geräte und Anlagen werden entweder sehr allgemein gehalten oder nur für einen spezifischen Maschinentyp gemacht. Detailliertere Angaben findet man insbesondere in folgenden Normen:

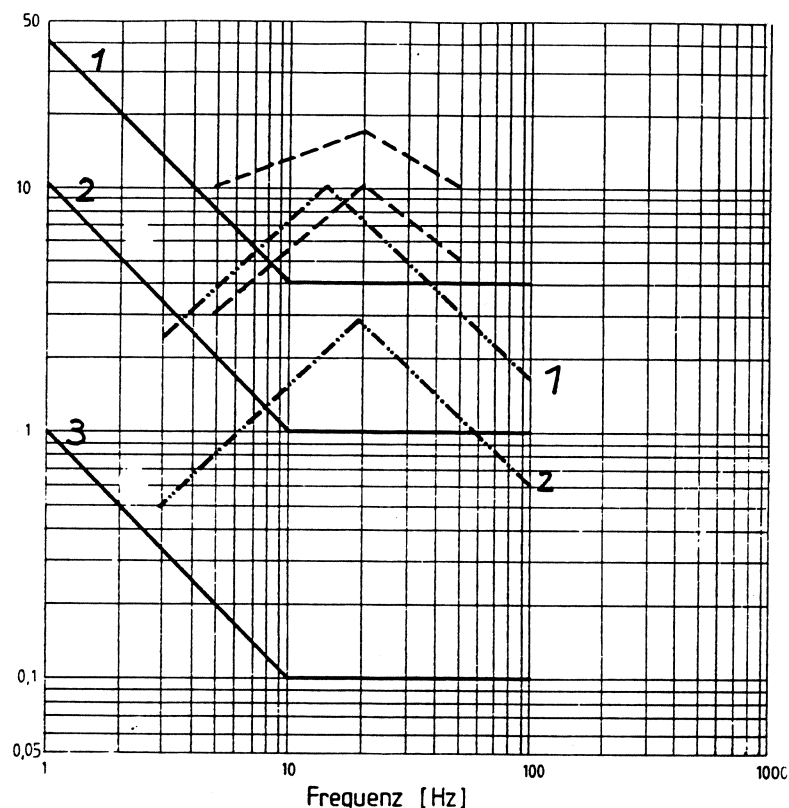
- ISO 2372, 1974
- ISO 2373, 1974
- VDI 2056, 1964
- VDI 2063, 1982
- ISA-Transactions, 1964

----- Richtwerte für Computeranlagen nach verschiedenen Herstellerangaben

- 1----- IBM Spezifikation, permanent-konstante Einwirkung
- 2----- IBM Spezifikation, transiente Einwirkung

- 1—— Dreh-, Fräs-, Bohr-, Schleif- und andere Metallbearbeitungsmaschinen üblicher Genauigkeitsklasse; Spinn- und Webmaschinen; Druckereimaschinen, Nähmaschinen u.ä
- 2—— Kugellager-, Gewinde- und andere Schleifmaschinen; Präzisionsfräs- und Drehmaschinen mit Toleranzen bis zu einigen hundertstel Millimeter u.ä.
- 3—— Präzisionsteilmaschinen und -automaten, Anlagen zum Abdrehen optischer Geräte und zum Eichen von Präzisionswägevorrückungen; Mikroskope und Messmikroskope; Optische Präzisionsinstrumente; mechan. Mess- und Kontrollgeräte für Toleranzen der Größenordnung von einigen 1/1000 mm u.ä

Geschwindigkeit [mm/s]



Tafel 3, Menschen

Belästigung

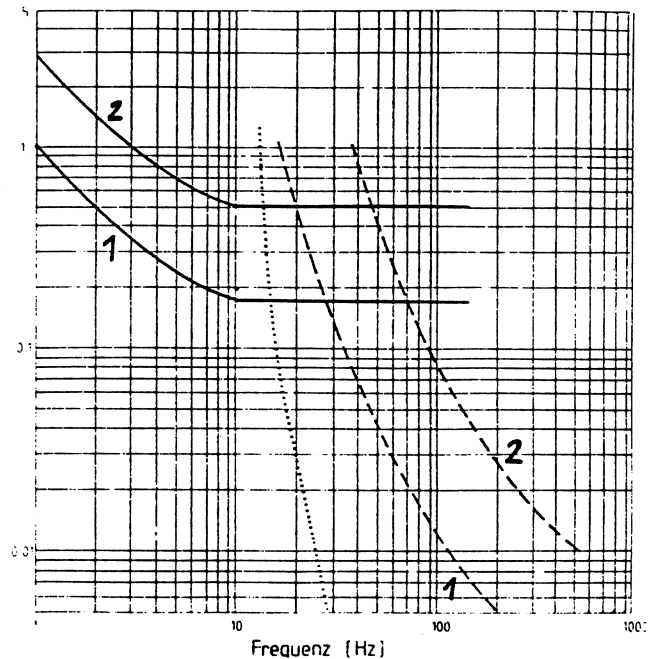
Zum Umweltschutzgesetz liegen noch keine Vollzugsverordnungen für Erschütterungsimmissionen vor, es gibt also noch keine verbindlichen Grenzwerte. Gleiches gilt auch für Körperschall. In Deutschland erfolgt die Beurteilung nach der DIN 4150 Teil 2 mit sogenannten KB-Werten. Die Beurteilung von Schwingungseinwirkungen auf Menschen ist unter Experten umstritten.

Das menschliche Erschütterungsempfinden wird abgegrenzt zwischen Körperschall und Erschütterungen: Mechanische Schwingungen unter etwa 30 Hz werden grundsätzlich als Vibrationen wahrgenommen; Bei Frequenzen über 30 Hz können die Schwingungen auch in Form von Körperschall wahrgenommen werden.

- 1 — Erschütterungen spürbar
- 2 — Erschütterungen lästig
- Grenze des Hörbereichs
- - - 1 - - - Körperschall deutlich hörbar*
- - - 2 - - - Körperschall lästig*

* gültig bei durchschnittlichen Abstrahl- und Dämpfungsbedingungen

Geschwindigkeit [mm/s]



Diese Tabelle gibt Richtwerte für die Störung von Anwohnern bei Vorbeifahrt eines Zuges (nach SBB)

Immissionsrichtwerte	Erschütterungen		abgestrahlter Körperschall Mittelungspegel L_{eq} [dBA]	
	$\bar{v}_{rms}$ [mm/s] Tag	Nacht	Tag	Nacht
reine Wohnzonen; Zonen für öffentliche Nutzung (Schulareale, Spitäler)	0,4	0,3	40	30
Mischzonen; städtische Kern- und ländliche Dorfzonen; Landwirtschaftszonen; vorbelastete reine Wohnzonen	0,5	0,4	45	35

Beurteilungskriterien für die Feinanalyse:

Für die Feinanalyse können bestehende Normen hinzugezogen werden. Tab 4.3 gibt einen Überblick über Normen und Richtlinien verschiedener Länder. Für die Schweiz bestehen noch keine neueren verbindliche Normen, vieles in diesem Gebiet ist noch im Fluss.

Anhaltswerte für Bauwerke	
- Norm SN 640 312 a (1992)	- Entwurf 2 Eurocode 2, (Stand 1984)
- Richtlinie KDT 046/72 (1972)	- Entwurf ISO/DIS 4866 (1984)
- Norm DIN 4150/3 (1983)	

Anhaltswerte für Anlagen und Geräte	
- Norm ISO 2372 (1974)	- Richtlinie VDI 2063 (1982)
- Norm ISO 2373 (1974)	- ISA-Transactions (1964)
- Richtlinie VDI 2056 (1964)	

Anhaltswerte für Menschen (Erschütterung)	
- Norm ISO 2631 (1978/85)	- Norm DIN 4150/2 (1975)
- Norm ANSI S.3.29 (1983)	- Norm DIN 4150/2 (1986)
- Norm BS 6472 (1984)	- Entwurf DIN 4150/2 (1990)
- Norm AFNOR E90-401 (1977)	- Richtlinie VDI 2057 (1979)

Anhaltswerte für Menschen (Körperschall)	
- Norm SIA 181 (1988)	- Richtlinie VDI 2058 Bl.1 (1973)
- Normentwurf DIN 4568 (1992)	- Richtlinie VDI 2719

Tab. 4.3, Richtlinien und Normen verschiedener Länder

5. Planung und Kontrolle

5.1 Planung

Projektanten stehen insbesondere bei der Planung von grossen Verkehrsanlagen (zB. innerstädtische U-Bahn- und S-Bahnstrecken, Hochgeschwindigkeitsstrecken) vermehrt vor der Frage, wie stark die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen infolge solcher Schienenanlagen sein werden. Um frühzeitig Reduktionsmassnahmen vorsehen zu können, sind in solchen Situationen Prognosen über die Grösse und über die Auswirkungen der Schwingungen bzw. des abgestrahlten Körperschalls zu machen.

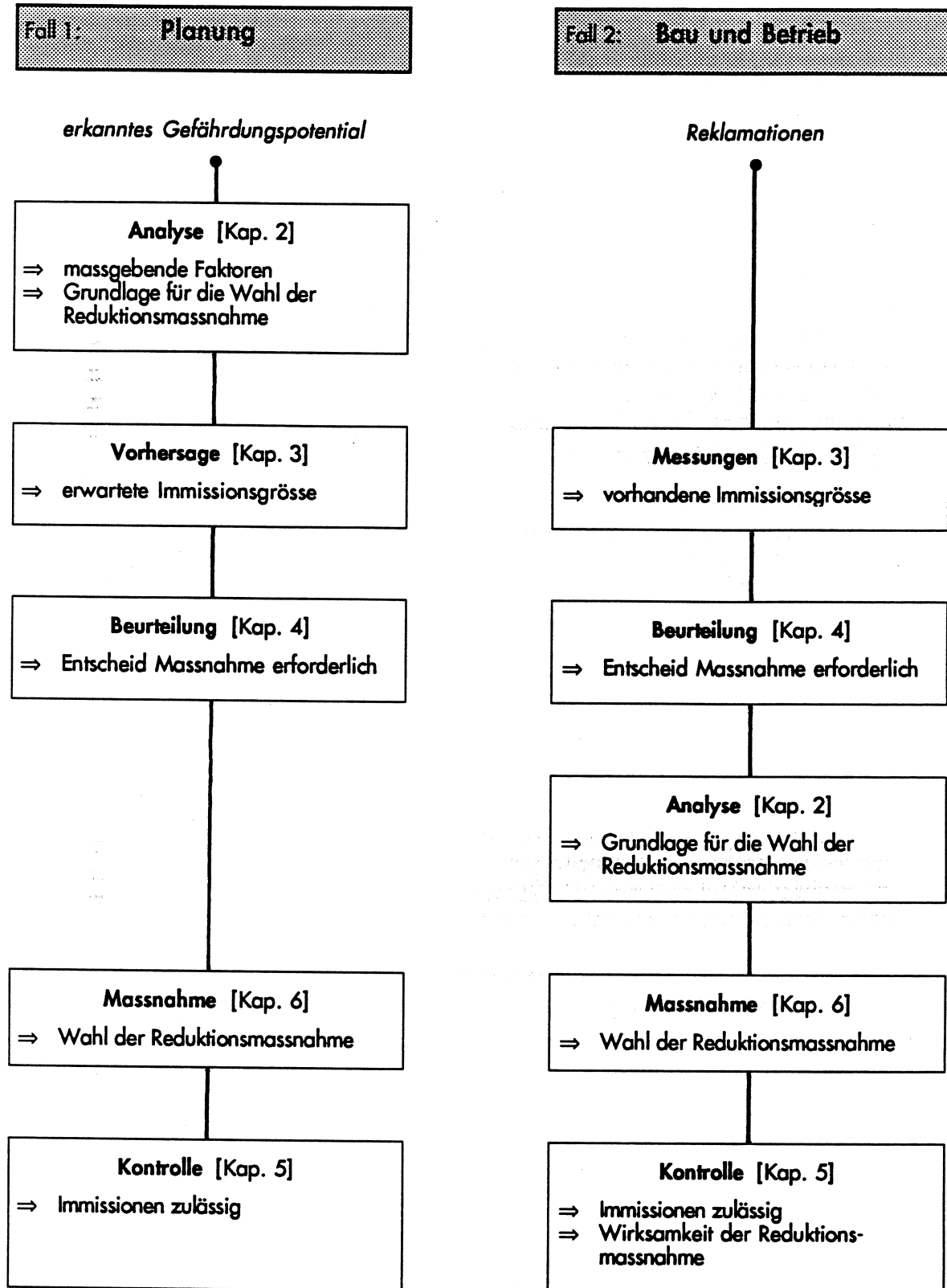
Eine andere Situation liegt vor, wenn aufgrund von Reklamationen oder Schäden bestehende Erschütterungsprobleme erkannt werden. In diesem Fall können, im Gegensatz zur Vorhersage, mit Hilfe von Erschütterungsmessungen die Immissionen quantifiziert werden. Es werden daher mehr oder weniger eindeutige Fakten ermittelt.

Bei der Planung von Reduktionsmassnahmen sind diese beiden Fälle zu unterscheiden. Die Vorgehensweise bei der Planung von Erschütterungsreduktionsmassnahmen wird anhand des nachfolgenden Schemas aufgezeigt. Zwischen dem Vorgehen bei erwarteten Erschütterungsproblemen (Fall 1) und dem Vorgehen bei bereits eingetretenen Problemen (Fall 2) bestehen grundsätzliche Unterschiede.

Je nach konkreter Situation müssen die einzelnen Teilschritte etwas modifiziert und eventuell wiederholt werden. Die Analyse dient gemäss Fall 2 einzig als Grundlage für die Massnahmenwahl; Selbstverständlich ist es aber für Messungen unumgänglich, bereits vorgängig die Situation kurz zu analysieren, um beispielsweise die Messstandorte festzulegen.

Anschliessend wird an zwei konkreten Beispielen aus der Praxis diese Vorgehensweise erläutert.

Tab. 5.1, Vorgehensweise bei der Behandlung von Erschütterungs- und Körperschallprobleme



Bemerkungen zu den einzelnen Teilschritten:

Fall 1: Planung:

- dieser Fall liegt vor, wenn Neubauten geplant werden und eine Gefährdung infolge unzulässiger Erschütterungsemissionen oder -immissionen erkannt wird. Die Frage, ob Reduktionsmassnahmen erforderlich werden, ist oft schon in der Vorstudien- bzw. Vorprojektphase relevant und muss entweder vom Projektanden selbst oder vom Spezialisten beantwortet werden. Prognosen können aber auch erst in der Submissionsphase erforderlich werden, vor allem dann, wenn die Auswirkungen verschiedener Bauverfahren beurteilt werden muss.

Fall 2: Bau und Betrieb:

- in der Regel werden Erschütterungs- bzw. Körperschallprobleme erkannt, wenn Reklamationen über erhöhte Belästigung von Anwohnern, über Störungen von Geräten oder über Schäden an Bauwerken eintreffen.
- während dem Bau (Ausführungsphase) werden in der Regel von der Bauleitung und der Unternehmung Reduktionsmassnahmen gefordert.
- unzulässige Immissionen verursacht durch den Betrieb von Verkehrsanlagen betrifft als erstes Behörden, Bauherrschaften und Unternehmungen.

Analyse (Kap. 2)

- Aufzeichnen der Ausgangslage in Grundrissen, Querschnitten, geologische Verhältnisse, Projektskizzen.
- Abgrenzung der Quelle, des Übertragungsmediums und der Empfänger, sowie Charakterisierung und Zusammenstellung der massgebenden Faktoren.
- Bestandesaufnahme bzw. Aufnahme der Ausgangslage (zB. Rissprotokolle), vgl. Tafel A, Seite 76.

Vorhersage (Kap. 3)

- semiempirische Abschätzungen
- Sensitivitätsanalysen
- Erfahrungen aus ähnlichen Situationen
- eventuell Ausbreitungsberechnungen
- Ausbreitungsverhalten mittels Schwingerversuchen (vgl. Tafel B, 'Dynamische Boden- und Bauwerksuntersuchungen', Seite 77)

Messungen (Kap. 3)

- Erschütterungs- und Körperschallmessungen
- alle massgebenden Faktoren sind implizit berücksichtigt
- eindeutige Fakten

Beurteilung (Kap. 4)

- Ausgrenzungsverfahren
- Vergleich mit Richtlinien und Normen

Massnahmen (Kap. 6)

- Planung generell: wo sind Massnahmen zu ergreifen und welche Strategie wird gewählt (Seite...)
- aufgrund einiger Auswahlkriterien können mögliche Varianten für Reduktionsmassnahmen aus dem Massnahmekatalog eruiert werden.

Kontrolle (Kap. 5)

- Kontrollen werden in verschiedenen Projektschritten durchgeführt
- Qualitätskontrolle bei der Implementierung der Reduktionsmassnahmen (Baukontrollen)
- Erfolgskontrolle: Sind die Immissionsgrenzen eingehalten und bei Fall 2 Überprüfung der Wirksamkeit der Reduktionsmassnahme durch Vergleich der Erschütterungs- und Körperschallwerte aus der Bestandesaufnahme.

5.2 Fallbeispiele

Beispiel A:

Sanierung Zuger Stadttunnel; Lärm und Erschütterungen (Fall 1)

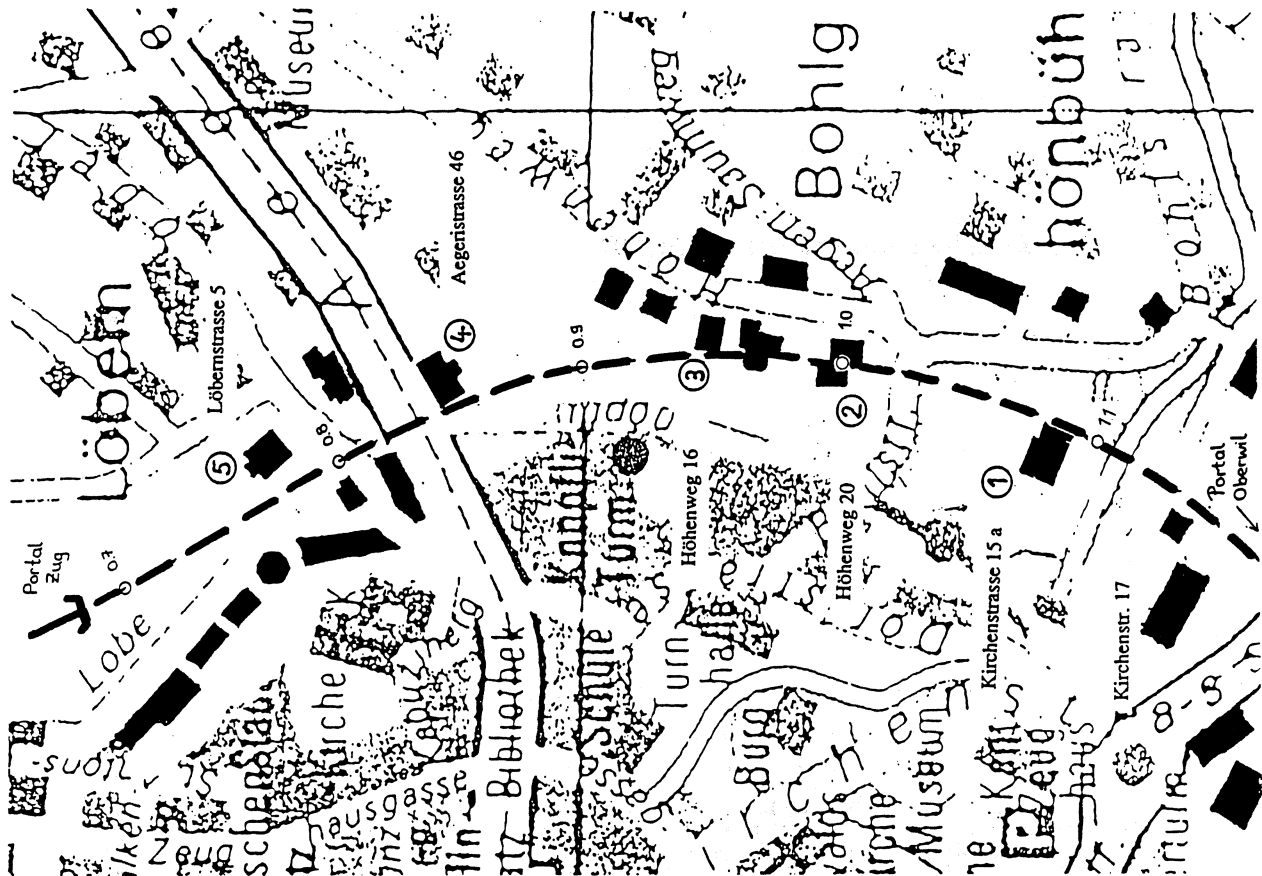


Fig. 5.1, Situation Zuger Stadttunnel

erkanntes
Gefährdungspotential



Ausgangslage:

Für den Zuger Stadttunnel der SBB-Strecke Zug-Oberwil waren umfassende Sanierungsarbeiten geplant. Um den Bahnbetrieb möglichst wenig einzuschränken, waren die Bauarbeiten auf die Nacht und die Randzeiten gelegt worden. Da der Stadttunnel Wohnhäuser direkt unterfährt und die Portalbereiche in bebautem Gebiet liegen, rechnete man mit erhöhter Immissionsbelastung der Anwohnerschaft infolge der Bauarbeiten. Den erwarteten Lärm- und Erschütterungsbelastungen wollte man frühzeitig Rechnung tragen. In der Folge wird die Beurteilung des reinen Aussenlärm im Portalbereich nicht besprochen.

Analyse [Kap. 2]

Quelle:

- vorhandener Bahnverkehr im Betrieb:
⇒ Klasse Nr. 8, Schienenverkehr
- Bauemissionen:
Vergleiche Tab. 5.2, Baugeräte im Einsatz:

	Gerätname	Marke	Typ	Leistung	Gewicht
1	Handabbauhammer	Atlas	-	-	28 kg
2	Handbohrhammer mit Bohrsäule	Atlas	-	-	25 kg
3	Dieselmotor 1-achsig	Atlas	Schraube	5 m ³ /Min	850 kg
4	hydraulischer Bagger Drehgelenk am Arm	Kamo	X5	45 kW	7'000 kg
5	hydraulischer Abbauhammer	NPK	H-4X	-	500 kg
6	Dieselmotor	Cat	6-Zylinder	150 PS	1'900 kg
Lüftungswagen SBB					
7	Dieselmotor	Cat	3306 T 6-Zylinder	185 PS	2'000 kg
8	Ventilator	Vortex	VML 140-12-6	38 m ³ /sec 55 kW	1'200 kg
Schrammjumbo					
9	Lafette mit Bohrhammer	Ingersold	VL 120	-	185 kg
10	Kompressor	Atlas	350 DD Schraube	21 m ³ /Min	4'400 kg
11	SBB Traktor 2-achsig	Rob. Aebi	TM IV	380 PS	30 t

Tab. 5.2, Baugeräte im Einsatz

Diese Geräte können folgenden Quellenklassen zugeordnet werden:

Klasse Nr.	Bezeichnung	Geräte
3	Rammen/Hämmern	1/5
4	Bohren/Fräsen	2/9
5	Motoren/Installationen	3/6/7/8/10
6	Bauverkehr	4/11

Übertragungsmedium:

Koppelung Quelle-Boden:

- Quelle: Tunnel aus Mauerwerk

Ausbreitung:

- Distanz Quelle-Empfänger: min. 4 m, im Schnitt ungefähr 8m
- Wellentyp: Raumwellen

Empfänger:

Ein- und Mehrfamilienhäuser in ruhiger Lage, Pfarrheim mit Gruppenräumen

- ⇒ massgebende Faktoren
- ⇒ Grundlage für die Wahl der Massnahmen

Kontrolle [Kap. 5]

Vor Beginn der Sanierungsarbeiten wurden Nullmessungen (vgl. Seite 76) durchgeführt. Einerseits dienten diese Messungen und Protokolle zur vorsorglichen Beweissicherung der heutigen Situation. Andererseits dienten diese Messungen als Grundlage für die Beurteilung der Immissionsbelastung durch den Zugverkehr und für den Entscheid zum Einbau von Unterschottermatten. Die Nullmessungen ergaben in drei direkt über dem Tunnel liegenden Wohnungen Schalldruckpegel (Körperschall) zwischen 40 und 50 dBA

Vorhersage [Kap. 3]

Um die Grösse der zu erwartenden Immissionswerte abschätzen zu können, wurden Messungen bei simulierten Baumemissionen durchgeführt

Phänomenologische Berechnungen wurden keine durchgeführt. Die Ausbreitungsmodelle für Verkehrserschütterungen sind für Bauerschütterungen nur bedingt geeignet. Es wird daher vor allem auf Messungen abgestellt.

Messungen Simulation Bauemission:

In drei verschiedenen Wohnungen wurden in Raummitte und auf dem Fenstersims die Erschütterungen und gleichzeitig mit einem Schallmessgerät der Innenlärm gemessen.

⇒ erwartete Immissionsgrössen

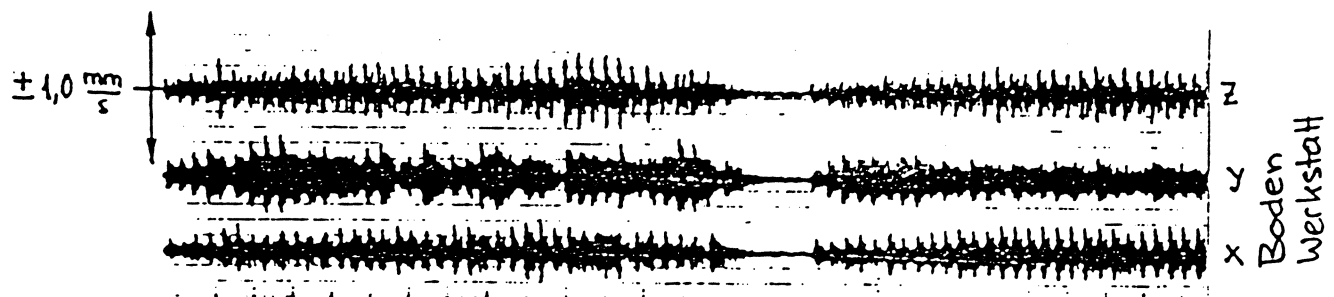
Messresultate:

Die stärksten Immissionen traten bei Einsatz des Monabert Abbauhammers und des Schrämmgerätes auf.

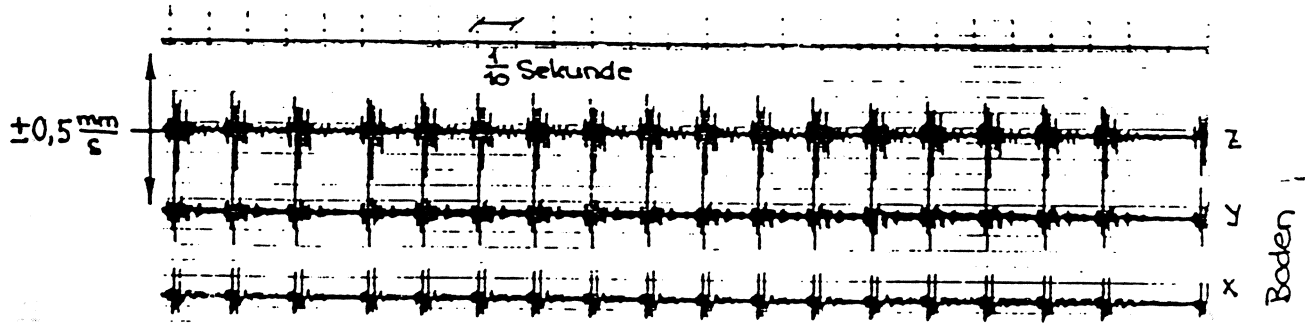
Die Schalldruckpegel lagen im Schnitt um 50 dBA herum, es wurden aber bis 78 dBA gemessen. Es wurden Spitzenschwinggeschwindigkeiten (Gesamtvektor) von über 1 mm/s gemessen. Obwohl die Immissionswerte bei beiden obengenannten Geräten in etwa gleich gross waren, wurde das Klopferäusch des Abbauhammer gegenüber dem Schrämmjumbo als unangenehmer empfunden.

Fig. 5.2, Schwinggeschwindigkeits-Zeitverläufe des Schrämmjumbo und des schweren Abbauhammers:

Schrämmjumbo



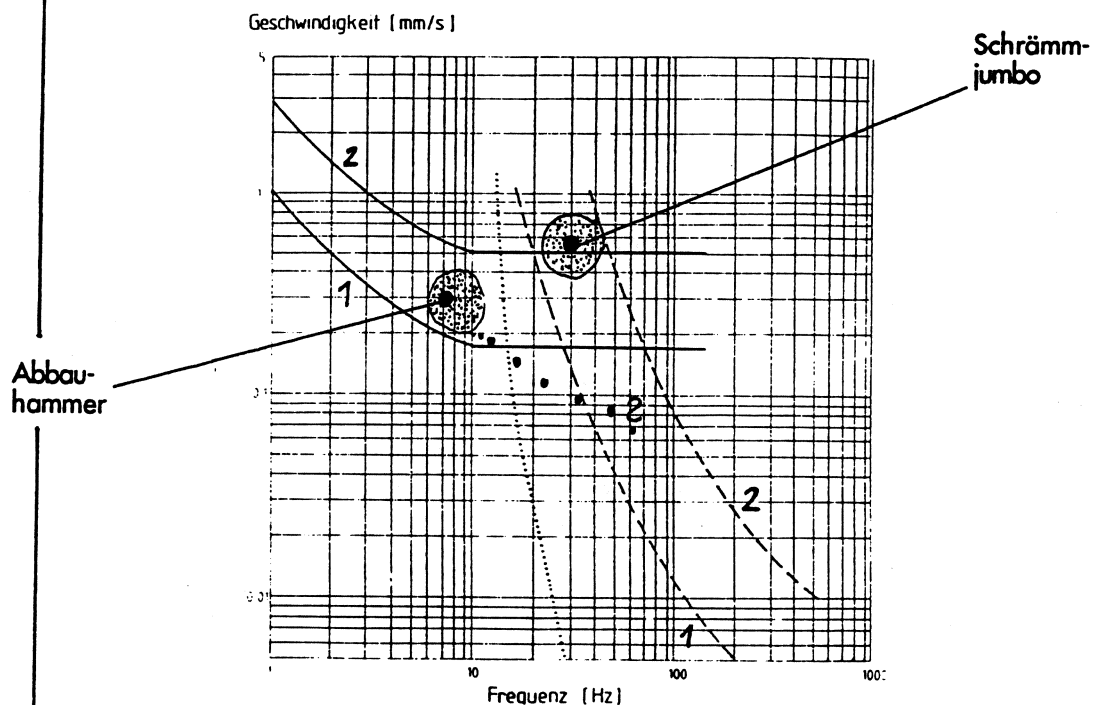
Abbauhammer



Beurteilung [Kap. 4]

Grobanalyse:

(Mit Hilfe von Tafel 3, Menschen Seite 59)



Feinanalyse:

Nach der Richtlinie VDI 2058 "Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft" soll vermieden werden, dass nachts folgende Körperschall-Werte nicht überschritten werden:

Kurze Geräuschspitzen: 35 dBA
Mittelungspegel: 25 dBA

Die Erschütterungen sollten nachts unter der Fühlbarkeitsgrenze von 0,15 mm/s (Spitzenwert) liegen. Diese Werte gelten für langdauernde Immissionen.

Einige Bemerkungen zur Auswahltablelle:

Die massgebenden Quellen gehören zur Klasse 3 und 4. Signifikante Resonanzprobleme sind nicht vorhanden, so dass Massnahmen, welche in erster Linie die Frequenz beeinflussen, nicht relevant werden.

Folgende Varianten zeigen übereinstimmende Auswahltabellen:

- (Nr. 1) **Linienführung/Standortwahl**
(Änderungen der Linienführung sind nicht mehr möglich, der Standort richtet sich nach den Sanierungserfordernissen, diese Massnahme kommt also nicht in Frage)
- Nr. 7 **Betriebsleistung variieren;**
Die gesamte Bauzeit könnte zwar durch den Einsatz mehrerer Baugeräte verkürzt werden, doch wird dies für die Anwohnerschaft kaum akzeptabel sein, da die Immissionen vor allem nachts auftreten. Der Einsatz von kleineren Geräten mit reduzierter Leistung, bspw. der Einsatz von Handbohrhämmer etc. könnte die Immissionen herabsetzen.
- Nr. 8 **Wechsel des Bauverfahrens**
Es zeigt sich, dass die Immissionen welche durch die Abbauhämmer verursacht werden, subjektiv als störender empfunden werden, als das kontinuierlichere Schrämmen.
Alternativen für den Abbau mit entscheidend günstigeren Emissionswerten existieren nicht.
- Nr. 9 **Betriebszeiten variieren**
Besonders erschütterungsintensive Bauarbeiten könnten zeitlich auf wenige Stunden begrenzt werden. Zum Beispiel Abbauarbeiten mit schweren Geräten nur bis Mitternacht oder nur während einer Nacht wöchentlich.
- Nr. 16 **Information/Orientierung**
Die direkt Betroffenen sollten frühzeitig und im Detail über die vorgesehenen Bauarbeiten in ihrem Abschnitt orientiert werden. Abweichungen vom Bauprogramm sind ebenfalls zu melden. Mit den Behörden ist zu klären, auf welchem Instanzenweg und auf welche Art allfällige Beschwerden behandelt werden.
- (Nr. 17) **Dislozierung**
Ist nicht durchführbar da zuviele Betroffene und zu lange Dauer
- Nr. 18 **Permanente Überwachung**
Durch eine Dauerüberwachung und Stichprobenmessungen können einerseits Gebäudeschäden durch frühzeitiges Erkennen von übermässigen Erschütterungen verhindert werden und andererseits erheblich störende Körperschall- und Erschütterungsmissionen erkannt und durch Veranlassung geeigneter Massnahmen (vgl. oben) vermieden werden.

Effektiv wurden folgende Massnahmen angeordnet (nur für Arbeiten im Tunnel):

Der Bauherr (SBB) hat folgende zusammengefassten Randbedingungen in die Submissionsunterlagen aufgenommen.

⇒ Wahl der Reduktionsmassnahmen

- Einsatz konventioneller Baugeräte (Abbauhammer bis max. 500 kg = Leistungsbegrenzung: Nr. 7) ab Oberwil bis ca. km 1.050. Die konventionellen Baugeräte dürfen eingesetzt werden, bis die max. zulässigen Körperschallwerte bei den nächstgelegenen Gebäuden über dem Tunnel erreicht werden (= permanente Überwachung: Nr 18)

⇒ Entscheid Massnahmen erforderlich

Massnahmen [Kap. 6]

Die Versuche haben gezeigt, dass die Immissionen infolge der schweren Abbaugeräte eindeutig unzumutbar sind. Es wurde beschlossen, dass die Geräusche infolge Körperschall auf max. 40 dBA begrenzt werden sollen und nicht länger als einige Nächte auftreten dürfen.

Aufgrund der Beurteilung waren also Massnahmen vorzusehen, um die Erschütterungs- und insbesondere die Körperschallbelastung gegebenenfalls reduzieren zu können.

Die massgebenden Quellen sind die schweren und leistungsstarken Abbaugeräte (Abbauhammer, Schrämmjumbo)

Strategie:

Aufgrund der besonderen Situation bleibt als Strategie nur die Reduktion der Erschütterungsentstehung und der Reduktion der Empfindlichkeit auf der Empfängerseite. Die Schwingungsübertragung und -ausbreitung kann nicht beeinflusst werden.

Wo Massnahmen ergreifen (vgl. Tab 6.1, Seite 80)

Die Quelle ist eindeutig definiert, temporär, ihr Standort ist aber nicht fix, breitbandige Anregung.

Betroffen sind mehrere Empfänger (Anwohner unmittelbar über dem Stadttunnel).

⇒ es sind grundsätzlich Massnahmen bei der Quelle wie beim Empfänger sinnvoll.

Massnahmenvarianten:

Aufgrund der Analyse sind Massnahmen, welche mit folgender Auswahl-tabelle übereinstimmen, geeignet:

Art: Ort:		bei der Quelle		im Übertragungsm.		beim Empfänger			
organisat.									
betrieblich									
baulich									
Einsatz		vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger		Bauwerke			Geräte			Mensch	
Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirkdauer		Häufigkeit	
Wirksamkeit		gut			mittel			gering	
Kosten		hoch			mittel			niedrig	
Realisierung		sofort			mittelfristig			langfristig	

- $v_{rms, \max} = 0.15 \text{ mm/s} \leq 50 \text{ Hz}$
 $v_{rms, \max} = 0.02 \text{ mm/s} > 50 \text{ Hz}$

Die Sanierungsarbeiten sind noch im Gange, die Massnahmen haben sich bewährt.

Rammerschütterungen beim Baulos Eilgut der S-Bahn Neubaustrecke,
(Fall 2)

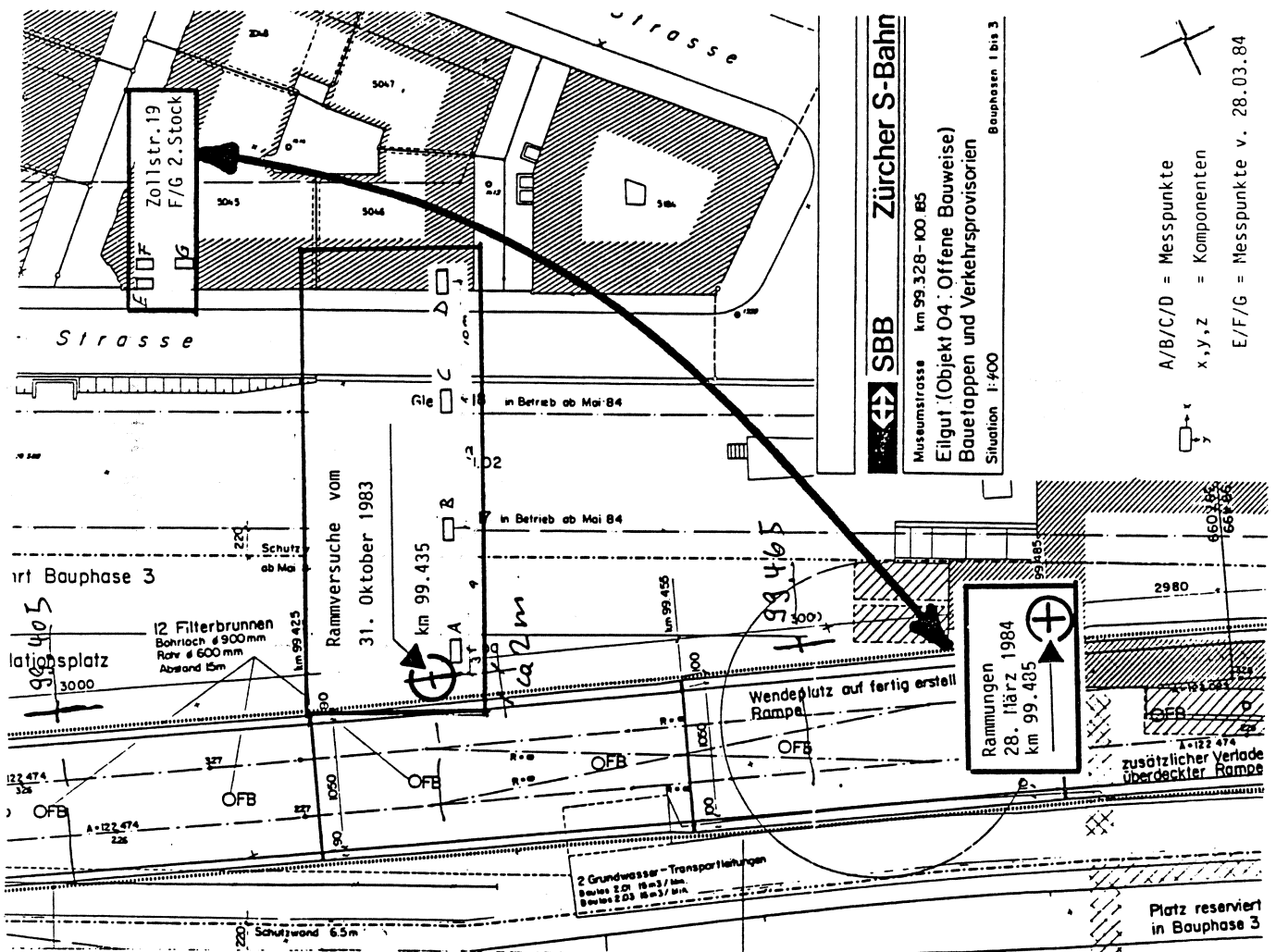
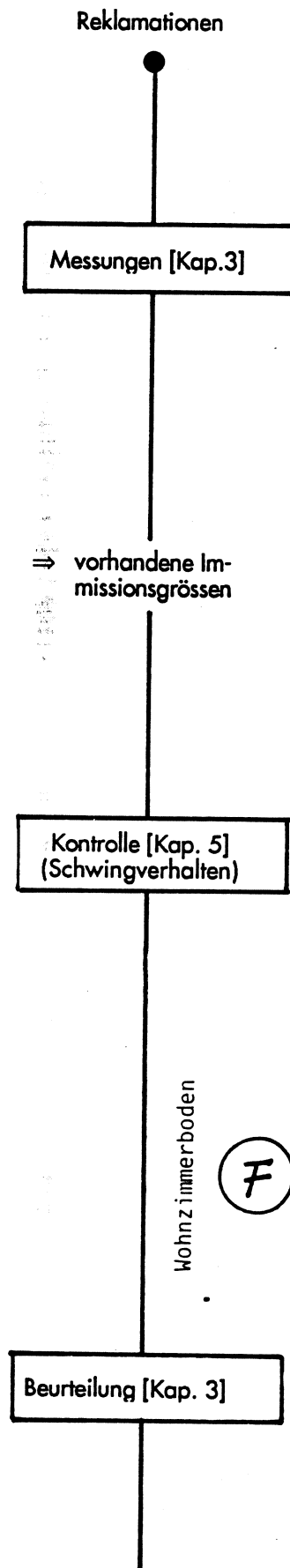


Fig. 5.3, Situation Baulos Eilgut Zürcher S-Bahn



Ausgangslage:

Beim Bau der Zürcher S-Bahn Neubaustrecke war im Baubüro Eilgut bei der Stadtpolizei eine Klage eingegangen, dass die Ramarbeiten unangenehme Erschütterungen bewirken. Das Ingenieurbüro GSS (Hr. Rutishauser) erhielt von der SBB den Auftrag, diese Immissionen zu beurteilen.

Das Messdispositiv wurde belästigungsrelevant ausgelegt, das heisst man konzentrierte sich auf die Einwirkung der Erschütterungen auf die Menschen.

Wahl der Messpunkte:

- E = an der Aussenmauer direkt unter der massgebenden Wohnung, ca 1.7m über Terrain (Fundamentanregung)
- F = in der Mitte des Wohnzimmers, Raumabmessungen ca. 4.5 x 5.0 m
- G = in der Mitte der Wohnküche, ca. 4 x 4.5m

Messergebnisse:

Verkehrerserschütterungen: (ausfahrende Züge und LKW's Zollstrasse)

E	R =	≤ 0.1 mm/s	12 - 20 Hz
F/G	R =	≤ 0.5 mm/s	12 - 18 Hz

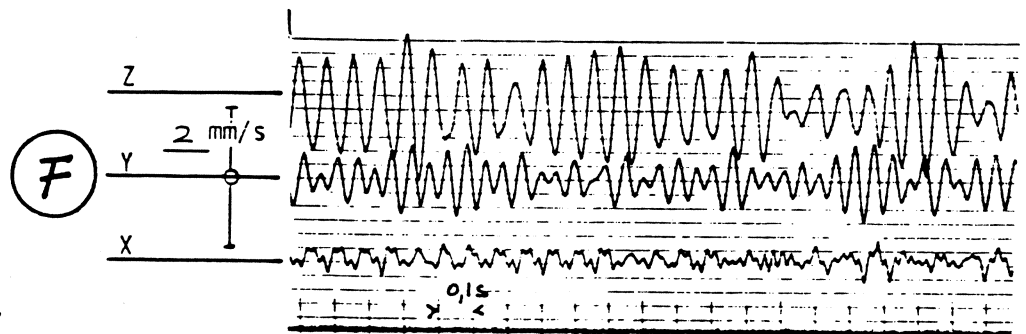
Höchstwerte der Erschütterungen während dem Rammvorgang:

E	R =	0.5 .. 0.6 mm/s	12.5 Hz
F	R =	2.7 mm/s	12.5 Hz
G	R =	5.4 mm/s	12.5 Hz

Dynamische Bauwerksuntersuchungen: B.3 Ausschwingversuche (Seite 77)

Eigenfrequenzen in vertikaler Richtung 10 - 12.5 Hz
behutsames Gehen bewirkt in 1m Distanz
in vertikaler Richtung: 2.0 mm/s

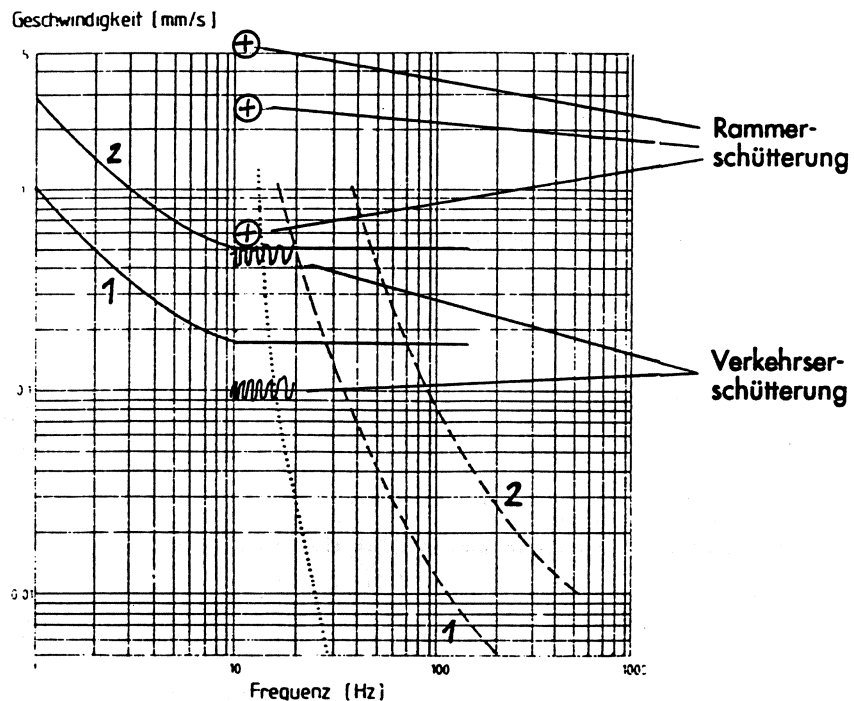
Fig. 5.4, Beispiel einer Messung (Schwinggeschwindigkeitszeitverlauf):



Die Erschütterungsmissionen wirken in erster Linie belästigend auf die Anwohnerschaft. Gebäudeschäden müssen aufgrund der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten kaum befürchtet werden. Richtwerte gemäss SN 640 312 a für sehr erschütterungsempfindliche Gebäude (Bspw. Holzdecken) v_{max} zwischen 2.5 und 5.0 mm/s, vgl. Seite 57)

• **Grobanalyse: (Ausgrenzung)**

Gemäss Tafel 3, Menschen, Seite 59:



• **Feinanalyse: v.a. nach DIN 4150/2**

Wahrnehmungsstärken: KB 0.35 bis 3.59

Erschütterungen über KB 1.6 gelten als stark spürbar, solche zwischen KB = 0.1 und 0.4 als gerade spürbar.

Bei der Beurteilung ist zu berücksichtigen dass die Erschütterungen gleichzeitig mit Lärmimmissionen auftreten.

⇒ Entscheid Massnahmen erforderlich

Die registrierten Immissionen werden gesamthaft als störend beurteilt. Es ist mit weiteren Reklamationen der Anwohnerschaft zu rechnen. Es sind deshalb Massnahmen erforderlich.

Analyse [Kap. 2]

Quelle:

Vibroramme VIBROFONCEUR PTC 25 H1

⇒ Klasse 2, Vibrationsgeräte

- Totalgewicht 6.5 t
- Drehzahl des Vibrators: 1'600 r/min = 26.6 Hz (schmalbandig)
- Länge der Bohlen: 20m, Rammtiefe 19m
- Einwirkungsdauer: wenige Minuten
- Häufigkeit: verteilt über den ganzen Arbeitstag

Übertragungsmedium:

- Distanz Quelle-Empfänger: während Messungen ≈ 75 m; im Laufe des Arbeitsfortschrittes bis ≈ 34 m (folglich muss im Lauf der Bauarbeiten noch mit höheren Immissionswerten gerechnet werden)
- Bodenart, Schichtung: 4 - 5 m dicke, harte Oberschicht

Empfänger:

Bauwerke:

- Bauwerkstyp, Baumaterial, Zustand: älteres mehrstöckiges Wohnhaus, Mauerstein
- Deckeneigenfrequenzen (gemessen) ≈ 12.5 Hz ($\approx$ die Hälfte der Anregungsfrequenz 26.6 Hz)

Mensch:

- Immissionsvorbelastung: Empfängerstandort unmittelbar an Geleise des Hauptbahnhofes
- andere Störeinflüsse: Baulärm
- Identifikation der Quelle: Quelle ist bekannt (= S-Bahn Baustelle)
- Tätigkeitsart: Wohnen
- Tageszeit: gesamter Arbeitstag

⇒ Grundlage für die Wahl der Massnahmen

Massnahmen [Kap. 6]

Strategie:

Reduktion der Erschütterungsentstehung, -übertragung und -empfindlichkeit

Wo Massnahmen ergreifen (vgl Tab 6.1, Seite 80)

Die Quelle ist eindeutig definiert, temporär, ihr Standort ist nicht fix, schmalbandige Anregung.
Betroffen sind einige Empfänger (Anwohner entlang der Linienbaustelle).

⇒ es sind grundsätzlich Massnahmen bei der Quelle wie beim Empfänger sinnvoll, ev. sogar im Übertragungsmedium

Massnahmenvarianten:

Aufgrund der Analyse sind Massnahmen welche mit folgender Auswahl-tabelle übereinstimmen geeignet:

Art:	Ort:	bei der Quelle	im Übertragungs-m.	beim Empfänger
organisat.				
betrieblich				
baulich				

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	

Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirk-dauer	Häufig-keit
---------	----------	--------	---------------	-------------

Wirksamkeit	gut	mittel	gering
-------------	-----	--------	--------

Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	safort	mittelfristig	langfristig

Folgende Varianten zeigen übereinstimmende Auswahltabellen:

- (Nr. 1) **Linienführung/Standortwahl**
(Änderungen der Linienführung sind nicht mehr möglich, diese Massnahme kommt also nicht in Frage)
- Nr. 7 **Betriebsleistung variieren;**
Die gesamte Rammzeit könnte verkürzt werden, wenn zusätzliche Rammgeräte eingesetzt würden. Die Dauer der Erschütterungseinwirkung auf die Anwohnerschaft könnte soweit reduziert werden, dass die Belastung akzeptabel wird.
- Nr. 8 **Wechsel des Bauverfahrens**
Es besteht die Möglichkeit die Spundwandbohlen mit hydraulischen Pressen immissionsfrei einzubringen. Eine andere Variante besteht darin, Schlagrammen einzusetzen $\Rightarrow$ keine Deckenresonanzen, dafür verstärkte Lärmbelastung.
- Nr. 9 **Betriebszeiten variieren**
Zeitliche Begrenzung der Rammarbeiten auf wenige Stunden am Tag
- Nr. 10 **Ändern der Erregerfrequenz**
Eventuell Einsatz von anderen Vibrationsgeräten mit deutlich anderer Drehzahl bzw. mit verstellbarer Drehzahl
- Nr. 15 **Vorauhuh/Vorbohren**
Die grössten Erschütterungen sind während dem Durchbohren der harten Oberschicht festgestellt worden. Durch einen Vorauhuh bzw durch Vorbohren könnte diese harte Schicht vorgängig erschütterungsfrei durchdrungen werden.
- Nr. 16 **Information/Orientierung**
Orientierung der betroffenen Anwohnerschaft über Grund und Art der Immissionen, über die genaue Zeitdauer der Immissionen und über die getroffenen Massnahmen
- (Nr. 17) **Dislozierung**
Ist nicht durchführbar
- (Nr. 18) **Permanente Überwachung**
eventuell periodische Messungen in den anliegenden Gebäuden entsprechend dem Baufortschritt zur Überwachung der weiteren Immissionen. Je nach Ergebnis können die Massnahmen gesteuert werden.

$\Rightarrow$ Wahl der Reduktionsmassnahme

Kontrolle [Kap. 5]

Die Bauherrschaft hat beschlossen, in den kritischen Abschnitten Vorbohrungen durchzuführen (Nr. 15)

Im weiteren Verlauf wurden die Arbeiten mit Erschütterungsaufnehmern überwacht. Weder beim Vorbohren noch beim anschliessenden Rammen traten Immissionen auf, welche deutlich über den einschlägigen Richtwerten lagen. Trotzdem kam es immer wieder zu vereinzelt Reklamationen besonders empfindlicher Personen (z.B. Krankenschwester mit Nachtschicht)

5.3 Kontrolle

Die Kontrolle hat bei dynamischen Problemen im Vergleich zu statischen Problemen eine ungleich grössere Bedeutung. Kontrollen sind in mehreren Projektschritten notwendig:

Die Kontrolle beginnt bereits mit der Aufnahme der Ausgangslage (vgl. Bestandsaufnahme, Seite 76). Viele der vorgeschlagenen Reduktionsmassnahmen erfordern die laufende Überwachung der Ausführung, die im Vergleich zur gewöhnlichen Baupraxis wesentlich sorgfältiger durchgeführt werden muss. Wenige mit Mörtel gefüllte Zwischenräume bei einer Passivisolierung beispielsweise bilden Körperschallbrücken, welche diese Massnahme fast vollständig zunichte machen können. Nach der Implementierung der Reduktionsmassnahme sollte mittels einer Erfolgskontrolle überprüft werden, ob die Anforderungen erfüllt sind. Der Vergleich mit Nullmessungen bringt nützliche Erkenntnisse über die Wirksamkeit der getroffenen Massnahme (vgl. 5.1 Planung, Seite 61).

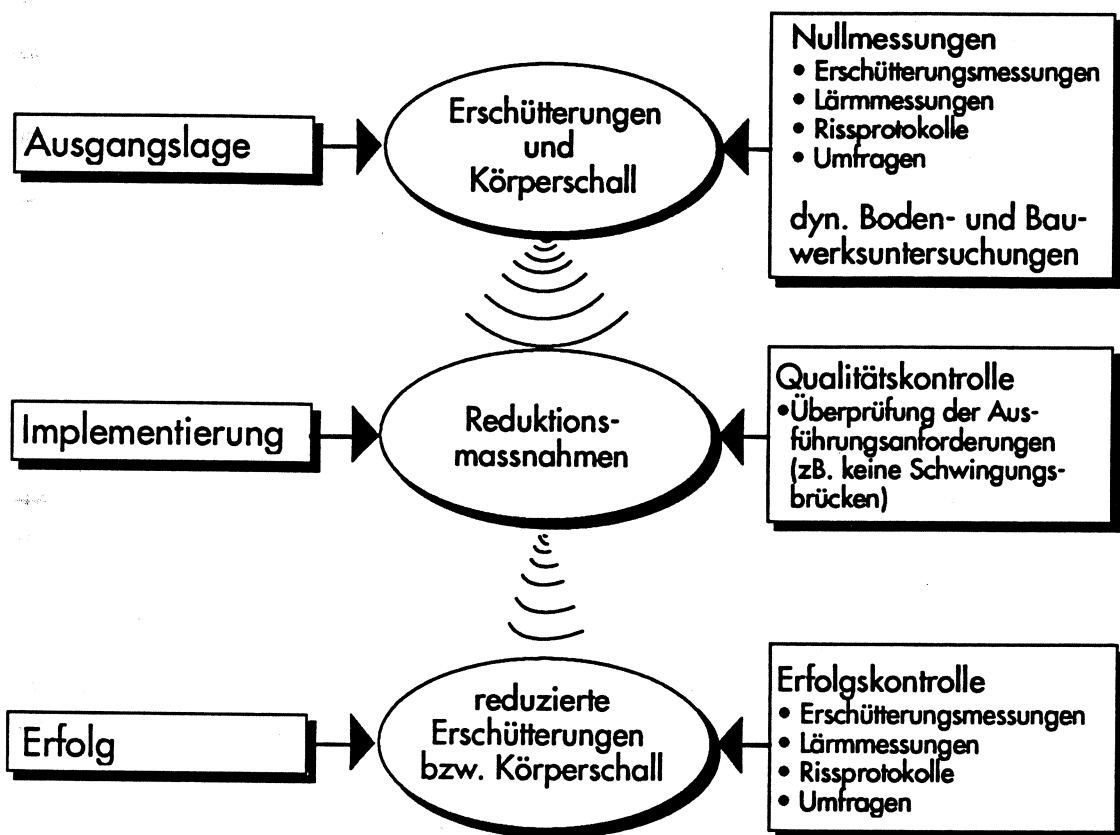


Fig. 5.5, Kontrollen

In den folgenden zwei Tafeln sind einige wichtige Kontrollelemente zusammengestellt:

Tafel A, Bestandesaufnahme

• Ziel:

Bevor eine Erschütterungsquelle wirksam wird, sollte in der Regel eine Bestandesaufnahme durchgeführt werden. Diese verfolgt vor allem folgende zwei Ziele:

1. **Feststellen der Ausgangslage** bezüglich der bereits vorhandenen Immissionsvorbelastung. Die Bestandesaufnahme bildet später die Grundlage für die Bestimmung der Immissionszunahme oder für die Beurteilung der Wirksamkeit einer Reduktionsmassnahme (vgl. Erfolgskontrolle).
2. **Zustandserfassung von Bauwerken.** Die Bestandesaufnahme dient in diesem Fall dazu, das tatsächliche Schadensmass infolge Erschütterungen nachträglich feststellen und möglichen unberechtigten Schadensforderungen vorbeugen zu können. Oft sind nicht Erschütterungen allein die Ursache von Gebäudeschäden.

• Methodik:

Grundsätzlich stehen zwei Möglichkeiten der Bestandesaufnahme zur Verfügung: Erschütterungs- und Körperschallmessungen sowie Zustandserfassung gefährdeter Objekte (Rissprotokolle)

Tab. 5.3, verschiedene Möglichkeiten der Bestandesaufnahme

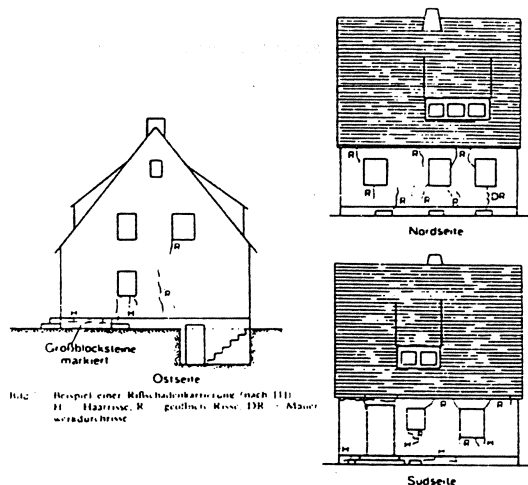
Empfänger:	Kriterium:	Massnahme zur Aufnahme der Ausgangslage:
Allgemein	Vorbelastung	• Erschütterungsmessungen (Nullmessungen)
Bauwerke	Schäden	• Rissprotokolle • Aufnahme anderer Schäden
Menschen	Belästigung	• Körperschallmessungen (Erschütterungsmessungen)

A.1 Erschütterungs- und Körperschallmessungen:

(vgl. Kap. 3.3. Seite 48 ff)

A.2 Rissprotokollaufnahmen:

- schriftliche Protokollierung
- einzeichnen der Risse in einem Plan
- photographieren der Schäden
- Protokollierung mit Hilfe eines Tonbandgerätes
- Anbringen von Siegeln (können auch durch Temperaturschwankungen reissen)
- Kombination einzelner Methoden



Tafel B, Dynamische Boden- und Bauwerkuntersuchungen

• Ziel:

Dynamische Boden- und Bauwerksuntersuchungen können als Grundlage für die Beurteilung von Erschütterungen und für die Wahl und Dimensionierung von Reduktionsmassnahmen wichtig sein. In der Bodendynamik sind zahlreiche Labor- und Feldversuche zur Bestimmung dynamischer Bodenkennziffern bekannt [2]. Für Erschütterungsprobleme, wie sie in der Praxis infolge Verkehrsanlagen auftreten, spielen solche Versuche in der Regel keine Rolle. Eine Ausnahme bilden zwei Versuche zur Bestimmung des Ausbreitungsverhalten der Bodenschwingungen und die Untersuchung des Schwingverhalten von Bauwerken oder einzelnen Bauteilen. Dynamische Kennziffern sind für die Bemessung von erschütterungsreduzierenden Massnahmen oft notwendig; Annahmen aus der Literatur sind oft sehr ungenau. Komplizierte Ausbreitungsberechnungen haben nur einen Sinn, wenn die Materialeigenschaften der Wirklichkeit entsprechen.

Für die Dimensionierung insbesondere für Frequenzabstimmungen ist das genaue Schwingverhalten von Bauwerken oder einzelnen Bauteilen erforderlich.

• Methodik:

Die folgende Tabelle (Tab.5.4) gibt einen Überblick der wichtigsten Untersuchungsmethoden und die daraus gewonnenen Kennziffern.

Untersuchungsmethode	dynamische Kennziffern
- Ausbreitungsverhalten: Schwingerversuche (B1) Probesprengungen (B2)	Übertragungsfunktionen dyn. G- und E-Modul
- Schwingungsverhalten von Bauwerken oder Bauteilen: Ausschwingversuche (B3)	Eigenfrequenz f_n , Dämpfungsmass ξ des Bauwerks oder des Bauteils

B.1 Schwingerversuche (Ausbreitungsverhalten):

Einfache Erschütterungsmessungen in verschiedenen Abständen von einer natürlichen Quelle (Baugeräte, Verkehr etc.) geben ein wirklichkeitsnahes Bild über das Ausbreitungsverhalten. Die dynamischen Kennziffern sind in solchen Messungen bereits implizit enthalten. Es besteht auch die Möglichkeit mittels Schlinger, meistens Antriebe mit rotierenden Unwuchten harmonische erzwungene Schwingungen zu erzeugen und Übertragungsfunktionen zu bestimmen.

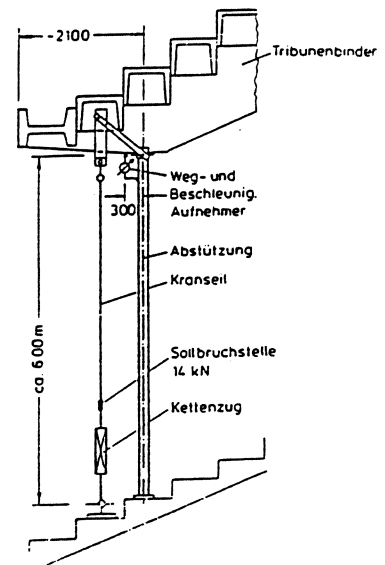
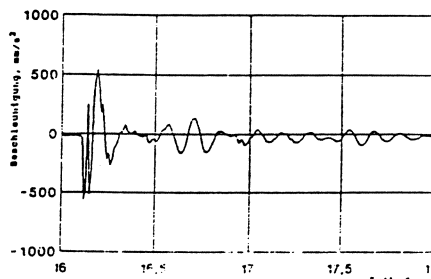
B.2 Probesprengungen:

Vergleiche Massnahme Nr.6, Seite 95: Sprengparameter ändern

B.3 Ausschwingversuche (Schwingverhalten):

Durch Impulsanregung können schwingfähige Systeme zu Eigenschwingungen angeregt werden. Es bestehen zahlreiche Möglichkeiten zur Anregung:

- Sandsack fallenlassen
- hochspringende Person
- Spannseil mit Sollbruchstelle (vgl. nebenstehende Figur)



6. Massnahmen

6.1 Einleitung

Bei der Vielfalt von Einflussfaktoren, welche bei der Entstehung und Ausbreitung von Erschütterungen massgebend werden können, ist es verständlich, dass rein von der physikalischen Seite her nur schwer eine für alle befriedigende und ausreichende Erschütterungspegelminderung realisierbar ist.

Dieses Kapitel enthält einen Katalog von möglichen Massnahmen zur Reduktion von Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall, welche beim Bau oder durch den Betrieb von Verkehrsanlagen auftreten können. Um bei konkreten Problemen rasch wirksame Massnahmen zu eruieren, sind die einzelnen Möglichkeiten steckbriefähnlich dargestellt und in einem strukturierten Katalog zusammengefasst.

6.2 Strategien

Reduktionsmassnahmen können unterschiedliche Strategien verfolgen. Es kann einerseits versucht werden die Entstehung, die Übertragung oder die Ausbreitung von Erschütterungen zu unterbinden oder zumindest abzumindern also quasi die Beanspruchung zu reduzieren. Andererseits können Massnahmen auch die Auswirkungen beziehungsweise die Empfindlichkeit gegenüber Erschütterungen herabsetzen, also quasi den Widerstand erhöhen (Fig. 6.1).

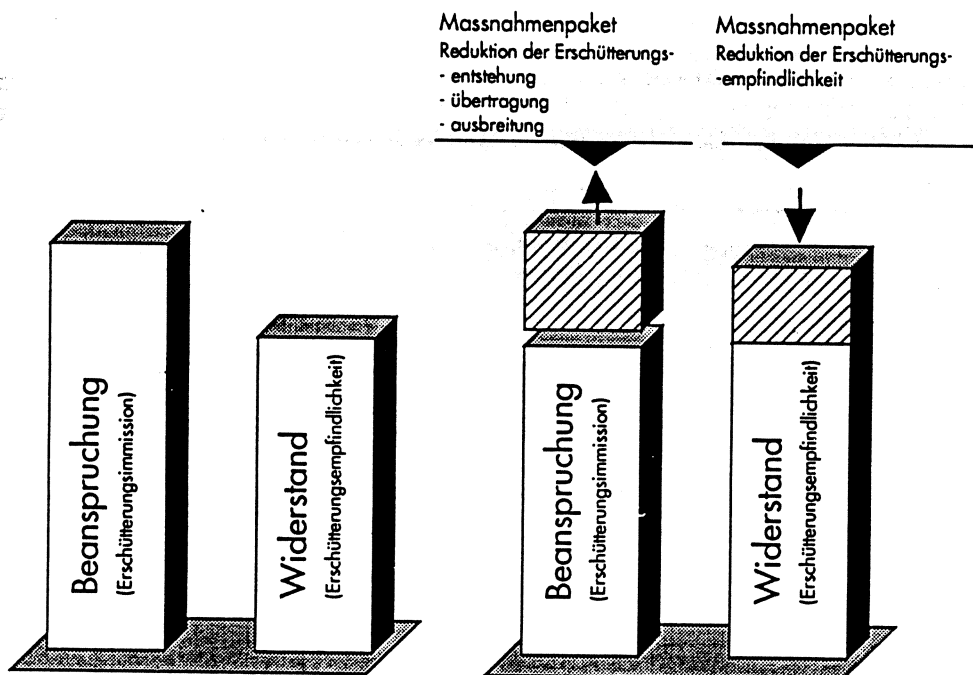


Fig. 6.1, Strategien zur Erschütterungsreduktion

Massnahmen können nach der **Art der Massnahme** unterschieden werden:

Mit **baulichen** Massnahmen kann vorwiegend die Schwingungsübertragung und -ausbreitung beeinflusst werden. Bauliche Eingriffe sind im allgemeinen kosten- und zeitaufwendig.

Durch Änderungen und Anpassungen beim **Betrieb** von Erschütterungsverursachern kann oft die Schwingungsentstehung eingeschränkt werden. Durch Einschränkungen beim Betrieb von Geräten auf der Empfängerseite können auch negative Erschütterungsauswirkungen umgangen werden.

Oftmals genügen **organisatorische** Massnahmen um die Entstehung von Erschütterungen zu verhindern oder deren Auswirkungen zu begrenzen.

Eine weitere Unterscheidung wird bezüglich dem **Ort der Massnahme** gemacht:

Am wirkungsvollsten zeigen sich Massnahmen bei der Quelle mit dem Ziel möglichst wenig Schwingungsenergie in die Umgebung zu übertragen (Oft als 'aktive' Massnahmen bezeichnet)

Ist dies nicht möglich oder zeigen sich nur bei einzelnen Empfängern schädigende oder störende Auswirkungen können auch Massnahmen beim Empfänger sinnvoll sein ('passive' Massnahmen).

Massnahmen im Boden beziehungsweise im Übertragungsmedium sind nur bei besonders günstigen Voraussetzungen möglich und wirkungsvoll.

Es ist zu beachten, dass durch Reduktionsmassnahmen Immissionsprobleme verlagert werden können. Namentlich durch Resonanzerscheinungen können Frequenzen verändert und Schwingungen verstärkt werden. Beispielsweise ist es schon vorgekommen, dass durch Isolationsmassnahmen an Schienenanlagen (Unterschottermatten o.ä.) zwar die Körperschallimmissionen reduziert werden konnten, jedoch die Vibrationen verstärkt wurden.

6.3 Wo sind Reduktionsmassnahmen anzusetzen

Eine erste Entscheidungshilfe, an welchem Punkt Massnahmen angesetzt werden sollen, kann die folgende Tabelle geben:

Randbedingungen und Einflussfaktoren, welche den günstigsten Standort der Massnahme bestimmen: Massnahmen...
...bei der Quelle: 1. Eine Quelle und viele Empfänger 2. Die Quelle ist eindeutig definiert 3. Quellenneubauten, beispielsweise neue Bahnlinie 4. temporäre Quellen, beispielsweise Quellen während dem Bau 5. fixe Quellen, das heisst deren Standort wechselt nicht 6. breitbandiger Frequenzbereich der Anregung
...im Übertragungsmedium: 7. breitbandiger und hochfrequenter Frequenzbereich der Anregung 8. Massnahmen an der Quelle betrieblich und technisch zu aufwendig, beispielsweise Bahnlinie unter Betrieb
...beim Empfänger: 9. Viele Quellen bzw. weite Ausdehnung der Quelle (Linienquelle) und ein Empfänger 10. Empfänger eindeutig definiert 11. Empfängerneubauten

Tab. 6.1, Erste Entscheidungshilfe, wo Massnahmen wirkungsvoll sind.

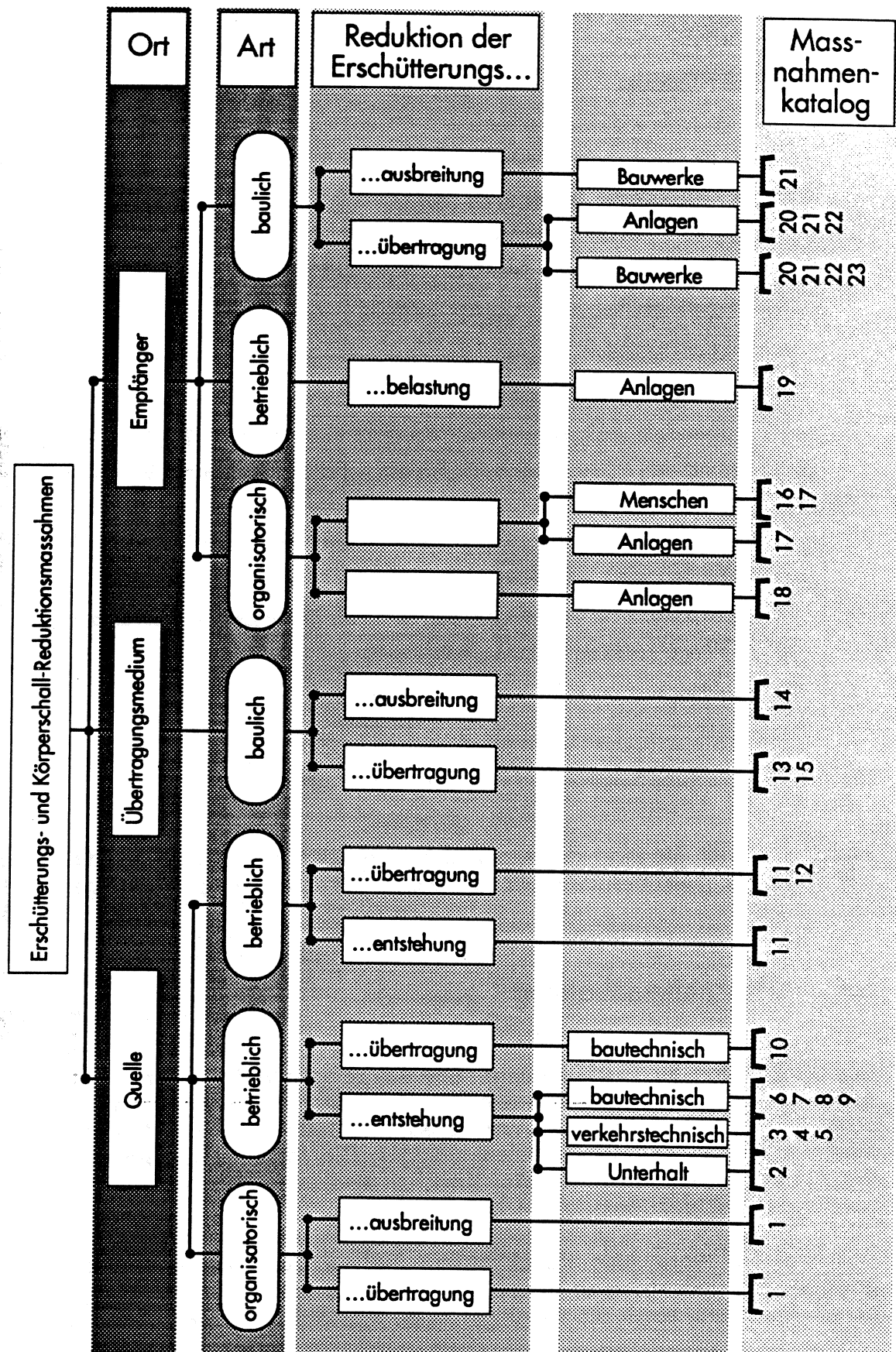
Vielmals ist der Standort der Massnahme bereits durch andere Randbedingungen, wie Zugänglichkeit, Besitzverhältnisse, etc., mehr oder weniger vorgegeben.

6.4 Massnahmenkatalog

Der Strukturplan für Erschütterungs- und Körperschallreduktionsmassnahmen (Tab. 6.2) fasst die vorgängig genannten Punkte zusammen und erlaubt somit rasch eine erste Auswahl von möglichen Massnahmen zu treffen. Tabelle 6.3 entspricht dem Inhaltsverzeichnis des Massnahmenkataloges. Die Massnahmen sind unterteilt nach der **Art der Massnahmen** in drei Kästchen und in jeweils drei Spalten aufgeteilt, welche den **Ort der Massnahme** bezeichnen.

Anschliessend wird jede Reduktionsmassnahme beschrieben und bewertet. Die gewählte Darstellungsweise erlaubt bei einem konkreten Erschütterungs- oder Körperschallproblem, rasch die wirkungsvollsten Massnahmen zu erurieren.

Tab. 6.2, Strukturplan für Erschütterungs- und Körperschallreduktionsmassnahmen



Tab. 6.3, Inhaltsverzeichnis Massnahmenkatalog, in Klammer die Seitenzahl

bei der Quelle	Im Übertragungsmedium	beim Empfänger
organisatorische Massnahmen		
1. Linienführung / Standortwahl (85)		16. Information/Orientierung (125) 17. Dislozierung (126) 18. Permanente Überwachung (127)
betriebliche Massnahmen		
2. Auswuchten rotierender Maschinenteile (87) 3. Geschwindigkeitsreduktion (89) 4. Gewichtsbeschränkung (91) 5. Fahrverbote / Umleitung (93) 6. Sprengparameter ändern (95) 7. Betriebsleistung variieren (99) 8. Wechsel des Bauverfahrens (101) 9. Betriebszeiten variieren (106) 10. Ändern der Erregerfrequenz (107)		19. Nutzungsbeschränkung (129)
bauliche Massnahmen		
11. Strassenbelagserneuerung (109) 12. Erschütterungsreduktion beim Schienenoberbau (111)	13. Fugen (116) 14. Bodenschlitze/Störkörper (117) 15. Voraushub (123)	20. Passivisolierung (130) 21. Aussteifung (134) 22. Schwingungs und Stosstilger (137) 23. Fundationsausbildung (139)

Einige Bemerkungen zum Aufbau der einzelnen Katalogseiten:

14. Bodenschlitze / Störkörper

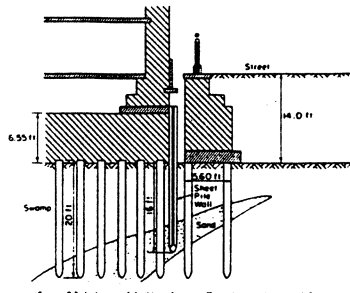


Figure 8.2. Isolation of building from traffic-induced vibrations (after Barton (1962)).

Art:	Ort:		
organisat.	bei der Quelle	im Übertragungsmedium	beim Empfänger
betrieblich			
baulich			

Einsetz	übertragungsmedium				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerk				Geräte		Mensch	

Wirkung	frequenz	Einwirkdauer	Häufigkeit
Wirksamkeit	gut	mittel	gering

Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	sofort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung:

Wirkung:

Wirksamkeit:

Dimensionierungsansätze:

Beispiele:

Literatur:

- **Nr. und Bezeichnung der Massnahme:** Die Massnahmen sind aufsteigend nummeriert, beginnend mit Massnahmen bei der Quelle, im Übertragungsmedium und zuletzt beim Empfänger.
- **Bild:** Die Illustration dient nur zur raschen Veranschaulichung der Massnahme.
- **Auswahltable:** Kurze Charakterisierung der Massnahme aufgrund des typischen Anwendungsbereiches. In spezielle Situationen ist die jeweilige Massnahme auch ausserhalb ihres typischen Charakterprofil anwendbar. (vgl. nähere Erläuterungen auf der folgenden Seite.)
- **Beschreibung:** Die Massnahme wird beschrieben. Mögliche Untergruppen werden aufgelistet.
- **Wirkung:** Die Wirkung der Massnahme wird genauer beschrieben.
- **Wirksamkeit:** Es werden, sofern vorhanden einige qualitative Aussagen über Wirkungsgrade gemacht
- **Dimensionierungsansätze:** Die wichtigsten Dimensionierungsansätze - vorwiegend bei baulichen Massnahmen - erlauben eine grobe Abschätzung des Kosten- und Zeitaufwand.
- **Beispiele:** Konkrete Anwendungsbeispiele der Massnahme oder denkbare Situationen, wo diese Massnahme Anwendung finden könnte.
- **Literaturangaben:** Literatur, wo umfassendere Information bezüglich der vorgeschlagenen Massnahme gefunden werden kann.

Auswahltabelle:

Art: \ Ort:	bei der Quelle	im Übertragungsm.	beim Empfänger
organisat.			
betrieblich			
baulich			

Dieses Kästchen zeigt Art und Ort der Massnahme

Anwendungsbereich:

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8

Erschütterungsprobleme erwartet
Erschütterungsprobleme bereits eingetroffen

typische Ursache bzw. Quellentyp

1. Sprengungen
2. Vibrationsgeräte
3. Rammen/Hämmern
4. Bohren/Fräsen
5. Motoren
6. Bauverkehr
7. Strassenverkehr
8. Schienenverkehr

Empfänger	Bauwerke	Geräte	Mensch
Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirkdauer \ Häufigkeit

massgebender Empfängertyp

Einflussfaktoren, welche durch diese Massnahme am häufigsten verändert werden.

Beurteilung: Infolge der grossen Unterschiede der Art und Weise der verschiedenen Massnahmen können keine quantifizierten Aussagen gemacht werden. Es wird vielmehr eine qualitative Aussage unter Berücksichtigung des "Aufwand/Ertrag" Verhältnisses gemacht, welche sich auf Untersuchungen und Erfahrung stützt.

Wirksamkeit	gut	mittel	gering
-------------	-----	--------	--------

Die Erschütterungsbeanspruchung oder deren Auswirkungen werden...

- [gut] = signifikant,
[mittel] = merklich,
[gering] = kaum spürbar
...reduziert.

Kosten	hoch	mittel	niedrig
--------	------	--------	---------

Kosten:

- [hoch] = deutlicher bzw. massgebender Kostenpunkt,
[mittel] = es entstehen Zusatzkosten
[niedrig] = die zusätzlichen Kosten fallen nicht oder kaum ins Gewicht.

Realisierung	sofort	mittelfristig	langfristig
--------------	--------	---------------	-------------

Realisierung:

Die Massnahme ist...

- [sofort] ...in weniger als ca. 2 bis 3 Tagen
[mittelfristig] ...in weniger als ca. 2 bis 3 Wochen
[langfristig] ...in mehr als 3 Wochen
wirksam

1. Linienführung / Standortwahl

Art: \ Ort:	bei der Quelle	im Übertragungsm.	beim Empfänger
organisat.			
betrieblich			
baulich			

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	

Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirkdauer	Häufigkeit
Wirksamkeit	gut		mittel	gering

Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	safort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: a) Linienführung

Die Erschütterungsgefährdung wird als Kriterium bei der Festlegung der Linienführung einer geplanten Verkehrsanlage miteinbezogen, so dass Konfliktsituationen präventiv umgangen oder zumindest frühzeitig erkannt werden.

b) Standort der Quelle

Bei auftretenden Vibrationsproblemen infolge Motoren und Installationen kann es eventuell genügen, den Standort beziehungsweise den Installationsplatz zu verlegen, um signifikante Erschütterungsreduktionen zu erzielen.

c) Standort des Empfängers

Analoge Überlegungen können auch bei der Wahl möglicher Empfängerstandorte gemacht werden. Insbesondere bei der Planung von Gebäuden und beim Aufstellen von Geräten können Konfliktsituationen frühzeitig vermieden werden (vgl. Beispiel).

Wirkung:

- Die Vergrößerung der Distanz zwischen Empfänger und Quelle führt in der Regel zu signifikanten Amplitudenreduktionen infolge geometrischer Dämpfung
- Vermeiden von Konfliktsituationen (Körperschall- und Erschütterungsbrücken) wie:
 - Fahrbahn direkt über bzw. unter dem Empfänger
 - Gebäude im Nahbereich von Brückenwiderlagern oder Stützen

- Schwingungsübertragungsbrücken zwischen Gebäude und Fahrbahn (Fahrbahnplatte direkt mit Gebäudefundament verbunden, Kanäle unter Strassen über Leitungssparten mit Gebäuden verbunden, usw.)
- Fahrbahn mit Stützmauer verbunden, besonders wenn die Mauer im Erdreich unter dem Gebäude verankert ist
- besondere geologische und hydrologische Untergrundverhältnisse (geschichteter Fels, hoher Grundwasserspiegel, etc.)

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist sehr unterschiedlich und ist insbesondere abhängig von der vorhandenen geologischen Situation. Eine Vergrösserung der Entfernung zur Quelle bringt aber in jedem Fall eine merkliche Erschütterungsabminderung. Die Grössenordnung der Amplitudenabminderung ist bei einfachen Bodenverhältnissen mit Hilfe der Abstand-Gesetze für den elastischen Halbraum rasch abzuschätzen.

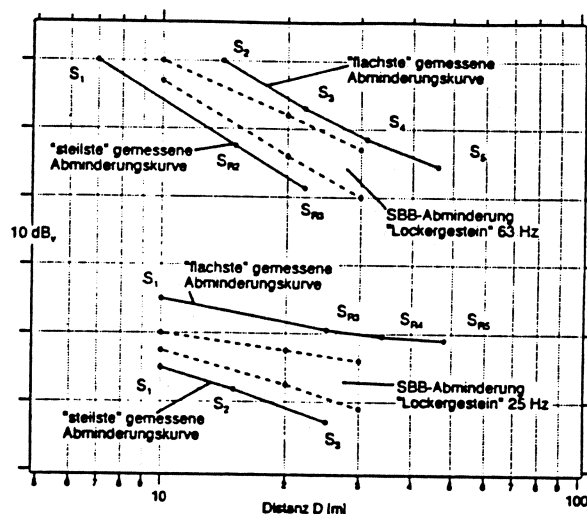
Dimensionierungsansätze Analyse der Erschütterungssituation, insbesondere der Untergrundverhältnisse.
Aufarbeitung der Erkenntnisse aus dem Kapitel 2.4.3 Ausbreitung (Seite 30), insbesondere die Abschnitte:

- Distanz Quelle - Empfänger (Abstand-Gesetze)
- Bodenart
- Schichtung
- Schwingungsübertragungsbrücken

Beispiele:

Bahn 2000; Tunnelneubau

Im Zusammenhang mit einer Tunnelneubaustrecke für die Bahn 2000 war eine Prognose für eine teilweise schon realisierte Grossüberbauung von ≈ 60 Einfamilienhäusern erforderlich. Mit Erschütterungsmessungen bei LkW-Passagen und bei Probesprengungen wurde die Wellenausbreitung definiert. Das folgende Bild zeigt den Vergleich zwischen den Messergebnissen und der gemäss SBB-Richtlinien empfohlenen Abminderung in Abhängigkeit der Distanz für zwei verschiedene Frequenzen.



empfohlenen Abminderung in Abhängigkeit der Distanz für zwei verschiedene Frequenzen. Das Ergebnis dieser Studie war die Ausscheidung eines Korridors von 30 m links und rechts ab Tunnelwand, innerhalb dessen die Überbauung vorderhand sistiert wird.

Fig. 6.2, Vergleich der gemessenen Abminderungskurve mit den Standardvorgaben der SBB/Literatur [1].

Literatur:

- [1] Bendel, H./Trombik, P.; 'Erschütterungen durch Baustellen und Verkehr - Prognosen, Messungen, Massnahmen', Dokumentation D079, Vibrationen, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Seite 117..122, 1991

2. Auswuchten rotierender Maschinenteile

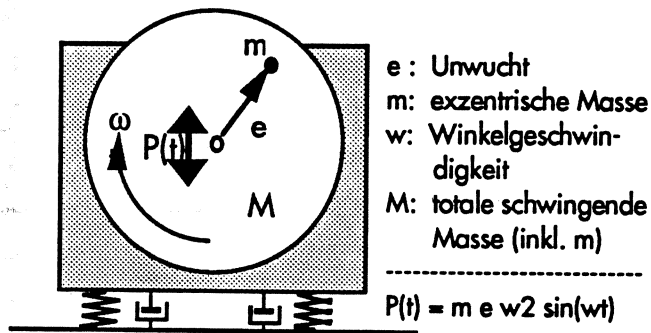


Fig. 6.3, rotierende Anregung

Art: Ort:		bei der Quelle				im Übertragungs-m.		beim Empfänger	
organisat.									
betrieblich									
baulich									
Einsatz		vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger		Bauwerke			Geräte		Mensch		
Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirkdauer		Häufigkeit	
Wirksamkeit		gut			mittel		gering		
Kosten		hoch			mittel		niedrig		
Realisierung		sofort			mittelfristig		langfristig		

Beschreibung: Bei permanent betriebenen Rotationsmaschinen können ungewollte Unwuchten und Lagerspiele starke dynamische Störkräfte verursachen. Ein ausgewuchteter Antrieb, beziehungsweise ein guter Massenausgleich der rotierenden Teile führt zu einer merklichen Reduktion der Störkräfte und somit der Erschütterungen. Diese Massnahme ist vor allem im Maschinenbau wichtig;

Bezüglich der Wartung oder Neubeschaffung von zahlreichen Geräten, wie sie insbesondere auf Baustellen gebraucht werden, ist auf diesen Punkt zu achten.

Bei Schienenfahrzeugen sind Unwuchten rotierender Teile kein relevantes Problem. Vielmehr können Erschütterungen infolge Unebenheiten des Schienenfahrspiegels, sogenannten Riffeln und Radbandagen, verursacht werden. Solche Abnützungserscheinungen können durch entsprechende Unterhaltsarbeiten - periodisches Glätten ver-riffelter Schienen (vgl. auch Seite 111, Massnahme Nr. 12, Dämm-massnahmen am Schienenoberbau), auswechseln abgenützter Räder - entfernt und so die Erschütterungsentstehung reduziert werden.

Wirkung: Die Störkraft wird verkleinert und somit die Schwingstärke merklich reduziert.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist abhängig vom Ausmass der Unwucht oder der Unebenheit. Schienenschleifen als Beispiel kann eine Schwingungsreduktion im Bereich oberhalb etwa 60 Hz um maximal 6 dB bewirken.

Dimensionierungsansätze Quadratische Anregung:

Fig. 6.4 zeigt die Resonanzkurve für eine quadratische Anregung eines Einmassenschwingsystem wie es auf der vorangehenden Seite dargestellt ist (Fig. 6.3). Der Verstärkungsfaktor entspricht dem Verhältnis der Amplitude A zu $(m \cdot e / M)$. Neben der Reduktion der Unwucht e besteht auch die Möglichkeit durch vergrößern der schwingenden Masse M bei Schwingungen oberhalb der Resonanzfrequenz die Amplitude zu reduzieren.

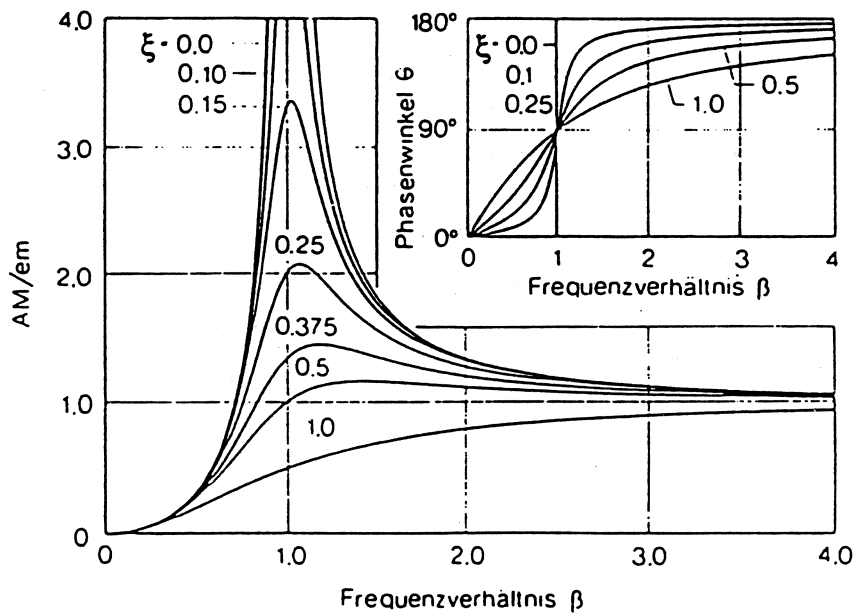


Fig. 6.4, Resonanzkurve für quadratische Anregung (vgl. Seite 8)

Beispiele:

- Intensiver Schienenunterhalt auf einem U-Bahnstreckenteil unter der Oper in Wien.

Literatur:

- [1] Studer, J.; Ziegler, A.; 'Bodendynamik; Grundlagen, Kennziffern, Probleme'; Springer-Verlag, 1986

3. Geschwindigkeitsbeschränkung

Art: Ort:		bei der Quelle		im Übertragungs-m.		beim Empfänger	
organisat.							
betrieblich							
baulich							

Einsatz				vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp				1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger				Bauwerke			Geräte		Mensch		

Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirkdauer		Häufigkeit	
---------	--	----------	--	--------	--	--------------	--	------------	--

Wirksamkeit		gut		mittel		gering	
-------------	--	-----	--	--------	--	--------	--

Kosten		hoch		mittel		niedrig	
Realisierung		sofort		mittelfristig		langfristig	

Beschreibung: Die Reduktion und Beschränkung der Fahrgeschwindigkeit von Strassen- oder Schienenfahrzeugen mittels Signalisation oder ähnlicher Massnahmen kann die Erschütterungsimmissionen teilweise herabsetzen. Dies gilt aber nicht bei starken Kurvenverhöhungen eines Bahngeleises, wo infolge der Fahrgeschwindigkeitsreduktion grosse Horizontalkräfte auf der innenseitigen Schiene auftreten und die Schwingungsanregung noch verstärken!

Wirkung: Durch die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit werden die Trägheitskräfte reduziert und somit die Amplituden beziehungsweise die Schwinggeschwindigkeiten verkleinert.
Gewisse Frequenzanteile - namentlich diejenigen Frequenzanteile infolge der diskreten (Schwellen)lagerung und infolge Unebenheiten - verschieben sich in tiefere Bereiche.
Einhergehend mit der Geschwindigkeitsreduktion verringert sich auch die Lärmemission.

Wirksamkeit: Im unmittelbaren Nahbereich (< 20 m) ist eine gewisse Schwinggeschwindigkeitsabminderung festzustellen. In der weiteren Umgebung (> 20 m) ist der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit gering, weil die tiefen Frequenzen davon in der Regel weniger betroffen sind (vgl. Seite 32).

Messungen bei der Münchener U-Bahn zeigten im körperschalltechnisch massgebenden Frequenzbereich >40 Hz für 40 km/h einen um 5 dB_v niedrigeren Pegel gegenüber 60 km/h

Dimensionierungsansätze Für Schienenfahrzeuge gilt näherungsweise nach [1]:

Fahrgeschwindigkeiten	Auswirkung auf Erschütterungen und Körperschall
< 80 km/h	<i>günstiger Einfluss</i>
80 bis 120 km/h	<i>nur geringen Einfluss</i>
> ca. 200 km/h	<i>keine signifikante Verschlechterung infolge Geschwindigkeitserhöhung mehr festzustellen</i>

Fig.6.5 zeigt Ergebnisse aus Messerien mit dem neuen ICE der Deutschen Bundesbahn [2]. Die Erschütterungsstärke bzw. die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten sind in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Entfernungen vom Schienengeleise aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit mit zunehmender Entfernung abnimmt. Zudem sind bei Fahrgeschwindigkeiten oberhalb ca. 200 km/h keine deutlichen Schwingverstärkungen mehr festzustellen. Entgegen den oben gemachten Angaben nach [1] zeigt diese Messung einen grossen Einfluss der Fahrgeschwindigkeit im Bereich zwischen 150..200 km/h. Dies verdeutlicht, wie schwierig es ist, generelle Aussagen machen zu können. Das Verhalten ist u.a. stark vom Fahrzeugtyp abhängig.

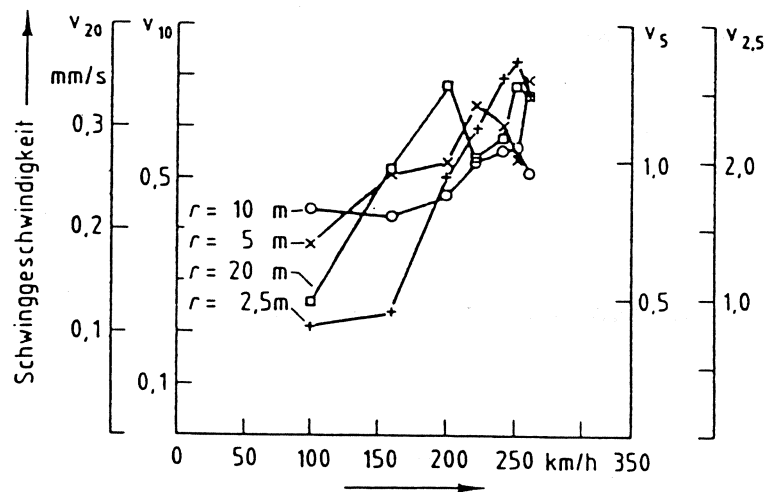


Fig.6.5, Schwinggeschwindigkeitsamplituden der Umgebung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit [2].

Beispiele:

- Fahrgeschwindigkeitsbeschränkung während der gesamten Ausstellungsdauer der Tut-Ench-Ammun Ausstellung in Berlin auf einer in unmittelbarer Nähe durchführenden U-Bahnstrecke.

Literatur:

- [1] Eisenmann, J.; Steinbeisser, L.; Deischl, F.; 'Körperschallemission bei S-Bahnen in Tunnellage'; ETR Eisenbahntechnische Rundschau 32, Seite 831, 1983
- [2] Auersch, L.; 'Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen/Messungen am ICE'; Forschungsbericht 155; BAM, Berlin, 1988
- [3] Braitsch, H.; 'Das "Kölner Ei" (Oberbau 1403/c), eine Neuentwicklung zur Eindämmung von Körperschall an Tunnel-, Brücken- und Hochbahngleisen'; Sonderdruck aus V + T, Hefte 7, 8, 10 und 12/1979, E. Schmidt Verlag, Bielefeld 1979

verkehrstechnische Massnahmen

4. Gewichtsbeschränkung

Art: Ort:	bei der Quelle	im Übertragungs-m.	beim Empfänger
organisat.			
betrieblich			
baulich			

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	

Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirk-dauer	Häufig-keit
Wirksamkeit	gut	mittel	gering	

Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	sofort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: Aus der Sicht eines festen Beobachters ausserhalb eines vorbeiwegten Fahrzeuges erzeugt dessen Eigengewicht Schwingungen, die umso grösser sind je grösser die anregende Last, also das Eigengewicht ist. Durch signalisierte oder anders beschränkte oder reduzierte Fahrzeuglasten auf bestimmten Strassen- oder Schienenabschnitten kann dieser Einfluss verringert werden.

Wirkung: Die Reduktion der Radlasten führt gleichzeitig zur Verkleinerung der wandernden, "statischen" Störkraft. Die Abminderung der Störkraft verringert die Schwingstärke. Infolge der Massenreduktion verändern sich aber auch die Eigenfrequenzen der einzelnen Schwingsysteme (Wagenkasten, Drehgestelle, etc.) so dass auch einzelne Frequenzanteile eine Verschiebung erfahren.

Wirksamkeit: Das Eigengewicht hat nur für den Fahrweg und im Nahbereich (<20m) einen massgebenden Einfluss; für die Umgebung (> 20 m) ist keine signifikante Schwingamplitudenreduktion mehr möglich. Messungen bei Anregung durch Schienenfahrzeuge verschiedener Achslasten zeigten im Frequenzbereich oberhalb 25 Hz nur geringe Pegelreduktionen von 2 .. 3 dB, zugunsten der leichteren Fahrzeuge. Im Strassenverkehr sind vor allem durch Lastkraftwagen und Omnibusse verursachte Erschütterungen relevant. Schwingungen infolge des leichten Strassenverkehrs (Personenwagen) sind kaum spürbar (Verhältnis $v_{\max}[\text{LkW}] : v_{\max}[\text{PW}] \approx 5$).

Dimensionierungsansätze

Die Schwingungsanregung infolge von Zugsdurchfahrten oder Durchfahrten von Strassenfahrzeugen ist aufgrund von Rückkoppelungen äusserst komplex und von unzähligen Faktoren abhängig. Der Einfluss der Fahrzeugmasse kann infolgedessen nicht einfach quantifiziert werden. Vereinfacht man das komplexe Schwingungsverhalten bei einer Fahrzeugdurchfahrt durch ein einfaches Fahrzeug-Untergrund-Modell gemäss Fig. 6.6, so lässt sich die anregende Kontaktkraft (Störkraft) $P(t)$ zwischen Rad und Schiene bzw. Strasse folgendermassen formulieren:

$$P(t) = m_u \cdot \ddot{z}_s + (m_u + m_f) \cdot g$$

$\ddot{z}_s$: vertikale Schwerpunktbeschleunigung der ungefederten Masse

m_u : ungefederte Fz-Masse

m_f : gefederte Fz-Masse

Sofern die Eigenfrequenz des Oberbaus bzw. der Strasse nicht mit der Fahrzeugeigenfrequenz übereinstimmt.

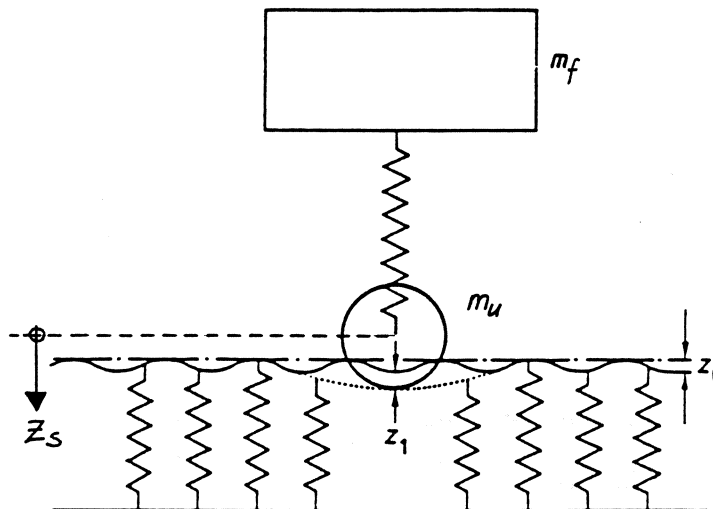


Fig. 6.6,
Einfaches Fahrzeug-Untergrund-Modell

Beispiel:

- Fahrverbot für schwere Fahrzeuge im Bereich des Domes in Florenz

Literatur:

- [1] Aversch, L.; 'Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen/Messungen am ICE'; Forschungsbericht 155; BAM, Berlin, 1988
- [2] Braitsch, H.; 'Das "Kölner Ei" (Oberbau 1403/c), eine Neuentwicklung zur Eindämmung von Körperschall an Tunnel-, Brücken- und Hochbahngleisen'; Sonderdruck aus V + T, Hefte 7, 8, 10 und 12/1979, E. Schmidt Verlag, Bielefeld 1979

5. Fahrverbote / Umleitungen

Art: Ort:		bei der Quelle		im Übertragungs-m.		beim Empfänger	
organisat.							
betrieblich							
baulich							

Einsatz		vorsorglich				bei Eintritt				
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8	
Empfänger		Bauwerke			Geräte			Mensch		

Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirkdauer		Häufigkeit	
Wirksamkeit		gut		mittel		gering			
Kosten		hoch		mittel		niedrig			
Realisierung		sofort		mittelfristig		langfristig			

Beschreibung: Der Strassenverkehr kann mit Hilfe entsprechender Signalisation aus bestimmten Strassenabschnitten umgeleitet oder durch Verbote ferngehalten werden. Diese Möglichkeit wird oft als einfache Lärmschutzmassnahme ergriffen und wird vor allem bei verkehrsreichen Strassen, welche durch Wohngebiete und an Spitälern vorbeiführen, angewendet. Denkbar ist diese Massnahme auch bei übermässiger Erschütterungsbeanspruchung von Menschen und empfindlichen Bauwerken. In der Praxis dürfte diese Möglichkeit aber vor allem bei Lärmimmissionen mit gleichzeitiger Erschütterungsbeanspruchung Anwendung finden.

Es sind zahlreiche Varianten, wie:

- Nachtfahrverbote (22.00 bis 6.00 Uhr),
- Verbote nur für bestimmte Verkehrsteilnehmer (LkW, Busse),
- Einbahnverkehr,
- etc.

denkbar

Wirkung: Mit dieser Massnahme wird in erster Linie die Einwirkungsdauer und die Häufigkeit der Lärm- und Erschütterungsbelastung reduziert. Die folgende Tabelle enthält die wichtigsten Faktoren, welche mit dieser Massnahme günstig beeinflusst werden können:

Bereich	massgebender Faktor
Quelle	Schwingungscharakteristik • Einwirkungsdauer • Häufigkeit
Empfänger Mensch	Umgebungsbedingungen • andere Störeinflüsse (Lärm) Tätigkeit • Tätigkeitsart • Tageszeit • Position

Wirksamkeit: Die Erschütterungsbelastung von Personen kann mit solchen Massnahmen wirkungsvoll beeinflusst werden. Die Wirksamkeit beruht vor allem darauf, dass die Immissionen entweder vollständig wegfallen oder stark abgeschwächt werden, und/oder die Immissionen auf Zeitabschnitte geringerer Lärm- und Erschütterungsempfindlichkeit beschränkt werden.

Dimensionierungsansätze Allgemein lässt sich sagen, dass die Erschütterungsempfindlichkeit von Menschen mit zunehmender Einwirkungsdauer zunimmt.

Verschiedene Normen unterscheiden bei der Festlegung von zulässigen Schwinggrössen - meistens die maximale Schwingbeschleunigung - bei Immissionen auf den Menschen zwischen der Einwirkung bei Tag und bei Nacht in Abhängigkeit zur Gebäudenutzung (Vergleiche DIN 4150/3, ISO 2631, ANSI S3.29 (1983) und andere). In der Nacht sind in der Grössenordnung eines Faktor 2 schärfere Erschütterungsgrenzwerte zugelassen als bei Tage, so dass besonders Nachtfahrverbote die Erschütterungsauswirkungen entscheidend mindern können.

Beispiele:

- Nächtliches Fahrverbot für motorisierten Strassenverkehr bei Spitalen.
- Fahrverbot im Bereich des Domes in Florenz

Literatur: [1] Griffin, M.J.; 'Handbook of Human Vibration'; Academic Press, London, 1990

6. Sprengparameter ändern

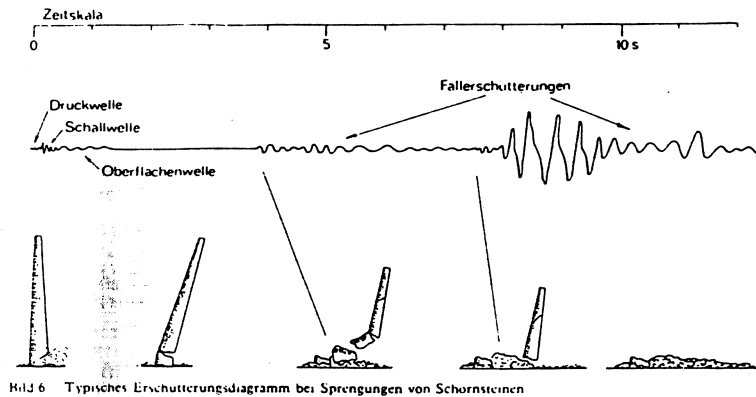


Fig. 6.7, Spreng- und Fallimpuls

Art: Ort:		bei der Quelle		im Übertragungs-m.		beim Empfänger	
organisat.							
betrieblich							
baulich							

Einsatz				vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp				1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger				Bauwerke			Geräte		Mensch		

Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirk-dauer		Häufig-keit	
Wirksamkeit		gut		mittel		gering			
Kosten		hoch		mittel		niedrig			
Realisierung		sofort		mittelfristig		langfristig			

Beschreibung: Massnahmen zur Reduktion von Sprengerschütterungen [1]:

- Verkleinerung der Lademenge pro Zeitzündstufe:
 - Anwendung mehrerer Zeitzündstufen (Reihensprengungen)
 - pro m³ Fels mehr Bohrlöcher bohren
 - kürzere Bohrlöcher bohren
- geeignete Abbaurichtung wählen
- Verwendung weniger dichten Sprengstoffs
- gestreckte Ladungen verwenden
- Anwendung von Spezialverfahren: z.B. Vorspalten (Presplitting)
- genaue Dosierung der Lademenge
- Verdämmung (= Material, mit dem das Bohrloch über der Ladung wieder verstopft wird)
- Vorgabe (= kürzeste Entfernung von einer Ladung zur nächsten freien Oberfläche)

Die bei Sprengarbeiten auftretenden Erschütterungen hängen ausser von der eingesetzten **Sprengstoffmenge**, weitgehend von der **Art der Sprengstoff-Laderäume** ab. Extreme Bedingungen liegen bei Auflagerladungen (oberflächlich aufgelegte Ladungen) im Vergleich zu verdämmten Bohrlochladungen vor. Unter einer Bohrlochladung ist in diesem Zusammenhang eine geballte Sprengladung mit Verdämmung zu verstehen, deren Vorgabe, bzw. Bohrlochtiefe wesentlich grösser als die Grenzvorgabe der Ladung ist.

Wirksamkeit: Die *Erschütterungsintensität* kann theoretisch beliebig reduziert werden; natürlich auf Kosten der Abschlagsmenge pro Zündung und schlussendlich auch auf Kosten der *Einwirkungsdauer* und *Häufigkeit* von Erschütterungseinwirkungen. Die Variation der Sprengparameter ist ein Optimierungsproblem.

Dimensionierungsansätze: Für sprengtechnische Fragen müssen Sprengexperten und entsprechende Fachliteratur beigezogen werden.
Für eine näherungsweise Abschätzung der Bodenerschütterungen in Abhängigkeit der Lademenge kann folgende Formel aus [3] benützt werden:

$$v = c W^{\alpha} r^{\beta}$$

Bei dieser Formel ist:

- v = die zu ermittelnde max. Schwinggeschwindigkeit [mm/s]
- c = Koeffizient für Sprengstofftyp und Energiekoppelung (empirisch), ist experimentell zu bestimmen (in bedenklichen Fällen immer mit 100 ansetzen)
- W = Sprengstoffmenge pro Zeitzündstufe [kg]
- r = Entfernung zur Sprengstelle [m]
- α = Skalierungsfaktor $1/3 < \alpha < 1/2$, meist $\alpha := 1/3$
- β = Skalierungsfaktor $-2 < \beta < -1$, (Punktquelle -2, Seite 30), ist experimentell zu bestimmen.

Die folgende Tabelle aus [1] erlaubt ebenfalls eine erste Abschätzung der Erschütterungsimmissionen.

durchschnittliche Erfahrungswerte für Sprengerschütterungen		
Erschütterung	Lademenge	Distanz zur Sprengstelle
5 mm/s	0,1 kg 1 kg 10 kg	ca. 10 m ca. 50 m ca. 100 m

Beim Übergang der Schwingungen von Fels auf Lockergestein tritt infolge Reflexionen (Impedanzsprung, Seite 11 und 31) eine deutliche Abminderung der Erschütterungen auf (mehrere dB_v, maximal 6 dB_v).

Bei Sprengdispositionen mit erschütterungsempfindlichen Objekten empfiehlt sich, neben der Variation der Sprengparameter folgende Vorgehensweise:

- | | |
|--|-----------|
| 1. Orientierung der Anwohner | Seite 125 |
| 2. Bestandesaufnahme (Rissprotokolle) | Seite 76 |
| 3. Probesprengungen ==> Sprengparameter ändern | Seite 77 |
| 4. Überwachung der Immissionen durch Erschütterungsmessungen | Seite 127 |

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass je mehr die Ladung verspannt ist, desto grösser werden die Erschütterungen. Vergleiche hierzu folgende Figur.

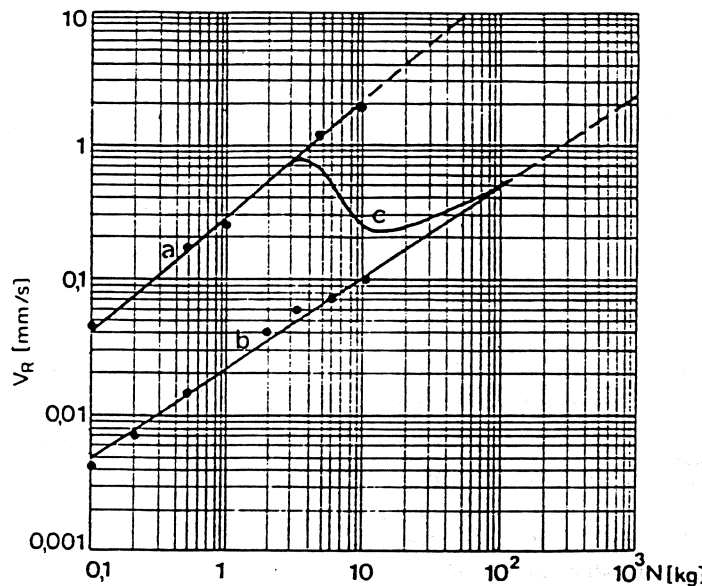


Fig. 6.8, [2]
Abhängigkeit der Schwinggeschwindigkeit von der Ladungsstärke unter verschiedenen Bedingungen

- a) verdämmte Ladung,
- b) Frei an der Oberfläche gezündete Ladung,
- c) Ladung mit geworfener Vorgabe.

Bei bestimmten Sprengarbeiten werden die stärksten Erschütterungen nicht durch die Vorgaben oder eingesetzten Sprengstoffmengen, sondern durch den Fallimpuls der abgesprengten Teile bestimmt (hohe Schornsteine, Brückenteile, etc. Vergleiche auch Fig.6.7).

Bei umfangreichen Sprengarbeiten und kritischen Dispositionen empfiehlt sich vorsorglich die Durchführung von Probesprengungen und Erschütterungsmessungen in der Umgebung. Die Auswertung solcher Messungen erlauben:

- die optimale Dosierung der Lademengen beziehungsweise der optimalen Sprengparameter
- Aussagen über Übertragungs- und Ausbreitungsfunktionen

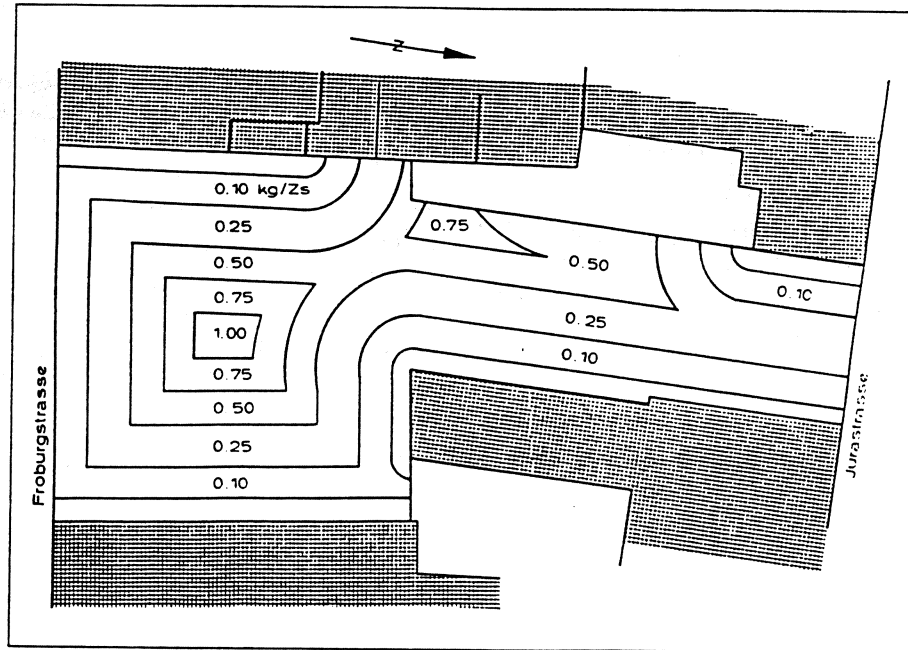
Wirkung:

Die Änderung der Sprengstoffmenge zielt in erster Linie auf die Reduktion der erschütterungserzeugenden Energiemenge ab. Durch die Vorgabe beziehungsweise der Art der Laderäume kann der Anteil, welcher in Abschlagsenergie umgewandelt wird und somit Bodenerschütterungen erzeugt, beeinflusst werden. Bei Sprengungen mit starker Verspannung gegenüber einer "normalen" Abschlagsprengung sind deutlich stärkere Erschütterungen zu erwarten. Durch den Aufprall von abgesprengten Bauwerksteilen auf die Bodenoberfläche wird Stossenergie freigesetzt, welche Erschütterungen erzeugen, die oft stärker sind als die eigentlichen Sprengerschütterungen!

Beispiele:

- In einer Baugrube mit vier Untergeschossen mussten zwei Meter kompakter Jurakalk mittels Sprengungen abgebaut werden [4]. Für die Bestandesaufnahme wurden von 25 Liegenschaften im Umkreis von 50 m Rissprotokolle erstellt. Anschliessend wurden 7 Probe-sprengungen mit unterschiedlichen Lademengen, Zeitabständen zwischen den Zündstufen und Lage innerhalb der Baugrube durchgeführt. Aufgrund der Messergebnisse von 6 Messpunkten und gemäss den Anhaltswerten der alten SNV Norm 640 312 wurde ein Zonenplan der zulässigen Lademengen erstellt, welcher als Submissionsunterlage dient. Während der Ausführung wurden die tatsächlichen Sprengerschütterungen dauernd überwacht.

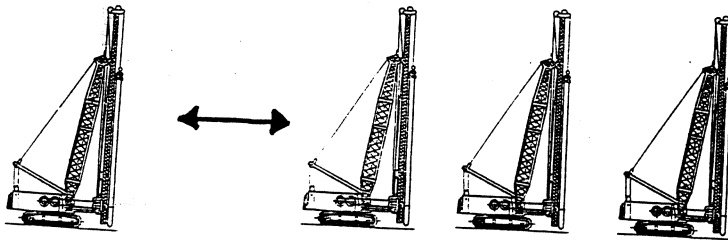
Bild 1. Zonenplan der zulässigen Lademengen



Literatur:

- [1] Kläy, J.R.; Hunziker, R.; 'Grundlagen gewerblicher Sprengtechnik'; Baufachverlag Zürich, Dietikon.
- [2] Böttcher, G.; Wüstenhagen, K.; 'Über die Beurteilung von Sprengerschütterungen und Bauwerksschäden', Nobel Hefte, Heft 1 Januar-März 1975, 41. Jahrgang
- [3] Studer, J.; Ziegler, A.; 'Bodendynamik; Grundlagen, Kennziffern, Probleme'; Springer-Verlag, 1986
- [4] Beispiel von Dr. H. Bendel; Geotechnisches Büro, Buchrain/Luzern

7. Betriebsleistung variieren



Art: Ort:		bei der Quelle		im Übertragungs-m.		beim Empfänger	
organisat.							
betrieblich							
baulich							

Einsatz		vorsorglich				bei Eintritt				
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8	
Empfänger		Bauwerke			Geräte			Mensch		

Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirk-dauer		Häufig-keit	
---------	--	----------	--	--------	--	---------------	--	-------------	--

Wirksamkeit		gut		mittel		gering	
-------------	--	-----	--	--------	--	--------	--

Kosten		hoch		mittel		niedrig	
Realisierung		sofort		mittelfristig		langfristig	

Beschreibung: Die Stärke der Schwingungen, welche durch Baugeräte und Motoren erzeugt werden, ist abhängig von der Schwingungs- oder Stossenergie, welche in den Untergrund abgegeben wird. Je leistungsstärker eine Maschine, desto grösser ist die abgegebene Schwingungsenergie.

Erschütterungsprobleme können vermieden werden, wenn die Geräteleistung verkleinert oder aber erhöht wird. Die Leistung auf der Baustelle kann variiert werden durch:

- Geräte verstellbarer Betriebsleistung (Änderung der Amplitude)
- Austausch von Baugeräten
- Änderung der Anzahl gleichzeitig im Einsatz stehender Baumaschinen

Wirkung:

Einfluss der Betriebsleistung auf erschütterungsrelevante Faktoren:

Leistungsstärke des Baugerätes	Einwirkungs-dauer	Amplitude
gross klein	kurz lang	hoch gering

Wirksamkeit: Eine Verkürzung der Einwirkungsdauer ist insbesondere bei der Belästigung von Menschen sehr wirkungsvoll, auch wenn dadurch höhere Schwinggeschwindigkeiten auftreten können.

Bei Gefahr von Schäden an Bauwerken infolge Bodenerschütterungen hingegen muss die Amplitude auf ein zulässiges Mass reduziert werden können, folglich muss die Leistung und damit die Schwingungsenergie auf Kosten der Einwirkungsdauer verkleinert werden.

Generell sollten solche einfachen Überlegungen bei erschütterungssensitiven Bauarbeiten immer gemacht werden. Oft lassen sich auf diese Weise Probleme einfach lösen.

Dimensionierungsansätze Die Erschütterungsstärke nimmt nicht linear mit der Erhöhung der Schwingungs- bzw. Stossenergie zu. Für eine Longitudinalwelle in einem elastischen Medium gilt folgende Beziehung zwischen der Energie E und der Amplitude A:

$$E = \frac{1}{2} c \cdot \rho \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot t \cdot S = f(A^2),$$

wobei c die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit, ρ die Dichte, t die Zeitdauer und S die Fläche durch welche die Energie fließt, ist. Aufgrund empirischer Versuche sind zahlreiche Gesetze aufgestellt worden, welche die Beziehung zwischen Energie E und der Schwinggeschwindigkeit v beschreiben. Beispielsweise nach Bendel [1]:

$$v = \frac{K \cdot E^\alpha}{D}$$

v := Schwinggeschwindigkeit

K := Konstante (Boden etc.)

E := Energie

$$\alpha_{\text{Dieselramme}} \approx 1/2$$

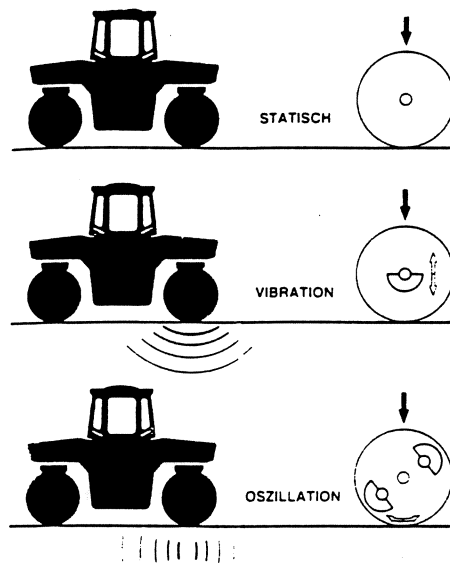
$$\alpha_{\text{Vibrator}} \approx 1/3$$

D := Distanz

(vgl. auch Massnahme Nr. 6, Sprengparameter ändern Seite 97)

- Literatur:** [1] Bendel, H./Trombik, P.; 'Erschütterungen durch Baustellen und Verkehr - Prognosen, Messungen, Massnahmen'; Dokumentation D079, Vibrationen; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Seite 117..122, 1991

8. Wechsel des Bauverfahren



Art:	Ort:	bei der Quelle				im Übertragungsm.		beim Empfänger	
organisat.									
betrieblich									
baulich									

Einsatz				vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8		
Empfänger		Bauwerke			Geräte			Mensch			

Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirkdauer		Häufigkeit	
---------	--	----------	--	--------	--	--------------	--	------------	--

Wirksamkeit		gut		mittel		gering	
-------------	--	-----	--	--------	--	--------	--

Kosten		hoch		mittel		niedrig	
Realisierung		sofort		mittelfristig		langfristig	

Beschreibung: Bei unzulässigen Vibrationsimmissionen, verursacht durch Bauarbeiten, besteht oft die Möglichkeit, das Verfahren zu wechseln. In Tab. 6.2 sind für unterschiedliche bautechnische Aufgaben verschiedene Bauverfahren angegeben. Die Methoden sind in der Reihenfolge abnehmender Erschütterungsemission aufgeführt. Vielfach bringen auch Kombinationen von Baumethoden die notwendige Erschütterungsreduktion.

Die Reihenfolge der Baumethoden berücksichtigt nur die *Erschütterungsstärke*. Oftmals sind andere erschütterungsrelevante Faktoren massgebend, so dass sich der Vergleich der Bauverfahren nicht allein auf die obige Liste beschränken darf. So erzeugen gewöhnlich Sprengungen im Vergleich zum mechanischen Abbau zwar grössere Schwinggeschwindigkeiten, hingegen ist die *Einwirkdauer* jeweils sehr kurz im Vergleich zum permanenten Hammerbetrieb.

Beim Vibrieren sind Resonanzen zB. von Gebäudedecken von Bedeutung. Solche Resonanzfrequenzen werden unter Umständen nur beim Anfahren und beim Abstellen durchlaufen. Es gibt spezielle Vibratoren, bei denen auch dieser Effekt mit technischen Mitteln vermieden werden kann (variable Exzentrizität, bzw. verstellbare Amplitude). In der Verdichtungstechnik scheint sich ein seit den achtziger Jahren bekanntes Verfahren mit oszillierenden Walzen bei Schwingungsgefährdeten Dispositionen durchzusetzen [3].

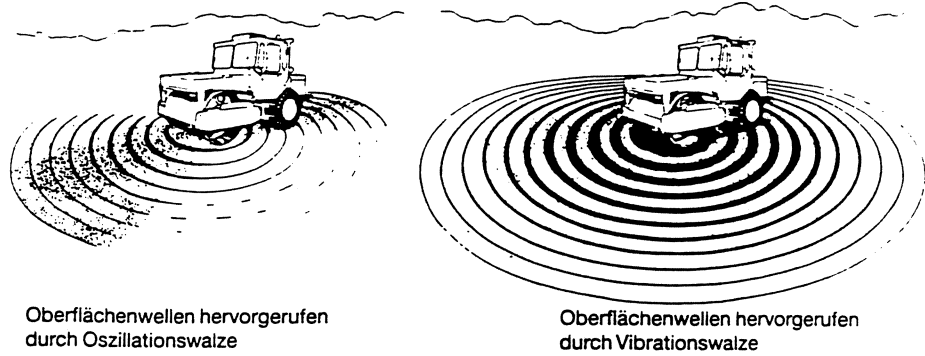


Fig. 6.9, Vergleich Oszillations- mit Vibrationswalze

Versuche zeigen eine gegenüber Vibrationswalzen im Nahbereich bis zu 85 % verminderte Erschütterungsstärke. Die Ausbreitung der Oberflächenwellen findet bei Oszillationswalzen - im Gegensatz zur radialen Ausbreitung bei Vibratoren (Fig. 6.9) - hauptsächlich in Längsrichtung statt, so dass sich diese Walzen vor allem für Verdichtungsarbeiten im innerstädtischen Bereich direkt neben Gebäuden, in Parkhäusern und auf Brücken eignen.

Tab. 6.2, Erschütterungsimmissionen verschiedener Bauverfahren im relativen Vergleich:

Baufaufgabe	Bauverfahren in Reihenfolge abnehmender Erschütterungsemission
Pfahlgründung	• Verdrängungspfähle: Schlagrammen...Vibrieren...Vorbohren...statisch Pressen* • eventuell umstellen auf Bohrpfähle
Baugrubenwand	• Spundwand/Trägerbohlwand: Schlagrammen...Vibrieren...Vorbohren...statisch drücken/ziehen • eventuell umstellen auf Schlitz-, Bohrpfahl-, Unterfangungswand
Verdichten	Walzen: Stampfen...Vibration...Oszillation...Statisch
Ankerbohren	
Felsabbau, Gebäudeabbruch	Sprengen...Hämmern (Abbauhämmern)...Rippen...Schrämmen ...hydraulische Pressen...Expansionsmörtel
Untertagebau	Sprengen...Vollschnitt...Teilschnitt

* nur Kleinpfähle

Wirkung:

Die Wirkung beruht in erster Linie auf der unterschiedlichen schwingungserzeugenden Quellencharakteristik der einzelnen Bauverfahren (vgl. Kap. 2.3. Erschütterungsquellen, Seite 20 ff).

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit solcher Massnahmen kann aufgrund der Reihenfolge in Tab.6.2 beurteilt werden. Je nach Empfänger typ ist die Wirksamkeit noch von anderen Faktoren abhängig (vgl. Tab.6.3). Bei der Ausführungs- und Einsatzplanung sind die Vor- und Nachteile jeder Baumethode sorgfältig gegeneinander abzuwägen.

Tab.6.3, zusätzlich zu berücksichtigende Einflussfaktoren in Abhängigkeit zum massgebenden Empfängertyp

Empfänger	zusätzliche massgebende Einflussfaktoren
Mensch	• Frequenz • Einwirkungsdauer und -zeitpunkt • Häufigkeit • Lärm • Luftverunreinigung (Abgase, Staub)
Bauwerke	• Frequenz, Einwirkungsdauer ==> Resonanzeffekte • plastische Deformationen bzw Setzungen im Untergrund ==> Setzungsempfindlichkeit

Dimensionierungsansätze Fig 6.10 zeigt gemessene Schwinggeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Distanz für verschiedene Bauverfahren. Die Messungen stammen aus zwei verschiedenen Messkampagnen, weshalb die Ergebnisse stark divergieren. Relativ betrachtet zeigen aber beide Messungen das gleiche Verhalten. Ein wichtiges Detail zeigt Messung 2 (vgl. auch Fig. 6.11); beim An- und Auslauf des Vibrators sind die Schwinggeschwindigkeiten deutlich höher als im Normalbetrieb. Dies ist auf Resonanzeffekte zurückzuführen, und ist bei der Beurteilung von Baumethoden zu berücksichtigen.

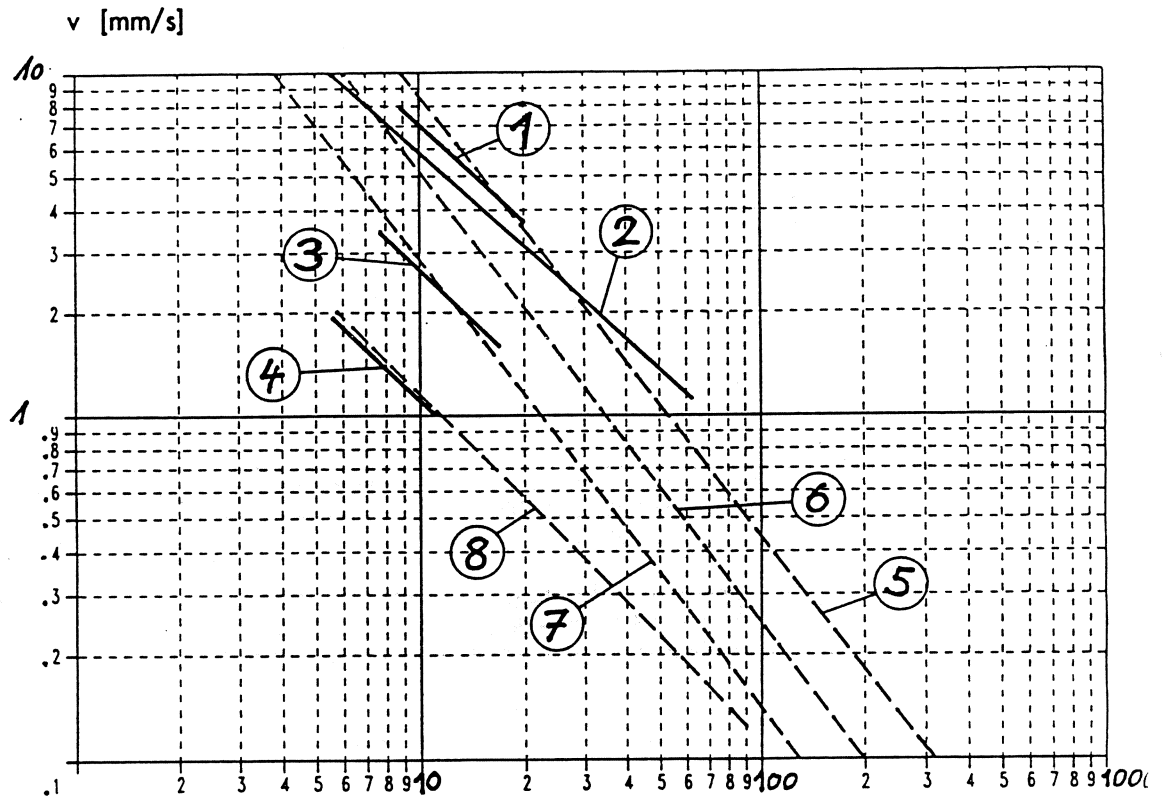


Fig. 6.10, Mittelwerte der Bodenschwinggeschwindigkeiten für verschiedene Rammgeräte:

Legende :

Messung 1 gemäss [1]

- 1 hydraulischer Freifallbär $G = 5$ to
- 2 Vibrator $G = 4.5$ to An-/Auslauf
- 3 Vibrator $G = 4.5$ to Normalbetrieb
- 4 Vibrator $G = 4.5$ to Ziehen der Spundwand

Messung 2 gemäss [2]

- 5 Freifallrammen Typ MRB 406
- 6 Dieselramme D 22, Typ Mera 39
- 7 Dieselramme D 12
- 8 Vibrationsramme TypMs 20H, 20H4 in Normalbetrieb

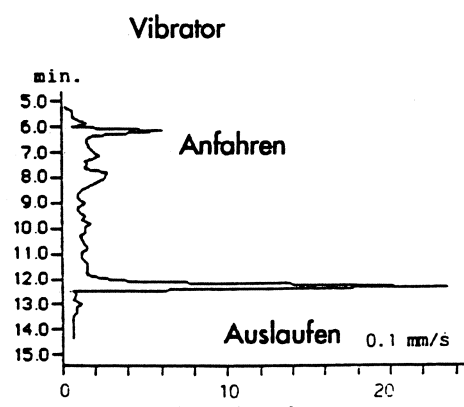
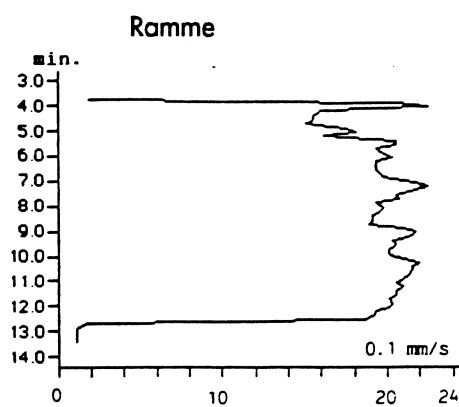


Fig. 6.11, Registrierung des Erschütterungsvektors während des Abteufens einer Spundwand.

Beispiele:

- In einem dichtbesiedelten Wohngebiet und im Fassungsbereich von Quellen mussten für die Erstellung einer Baugrube 40'000 m³ Granitfels abgetragen werden. Das ausgeschriebene Verfahren eines mechanischen Aushubes mittels Hydromeissel hatte infolge unzumutbarer Lärmbelastung über eine längere Zeitspanne viele Einsprachen zur Folge gehabt. Der Abtrag wurde daraufhin mittels 300 streng überwachten Lockerungssprengungen innerhalb von fünf Monaten ohne Schäden in den umliegenden Gebäuden und Thermalquellen ausgeführt. Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten lagen zwischen 0.05 bis 12.8 mm/s. Insbesondere die Belästigung der Anwohner konnte dadurch auf ein zulässiges Mass reduziert werden [4].

Literatur:

- [1] Bendel, H./Trombik, P.; 'Erschütterungen durch Baustellen und Verkehr - Prognosen, Messungen, Massnahmen'; Dokumentation D079, Vibrationen; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Seite 117..122, 1991
- [2] Rücker, W.; 'Elastische und plastische Effekte beim Einrütteln und Rammen von Pfählen und Spundwänden'; Dokumentation D079, Vibrationen; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Seite 123..132; 1991
- [3] Cohrs, H.H.; 'Oszillationswalzen - Meilenstein der Verdichtungstechnik?'; Tiefbau, Ingenieurbau, Strassenbau; Heft 8/92, Seite 584..589
- [4] Arnold, K.; 'Vorbeugender Schutz gegen Sprengerschütterungsschäden bei Felsaushubarbeiten'; Nobel Heft Januar-März 1978, Seite 17 ff.

bautechnische Massnahme

9. Betriebszeiten fixieren

Art:	Ort:								
organisat.		bei der Quelle				im Übertragungsm.		beim Empfänger	
betrieblich									
baulich									

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	

Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirkdauer	Häufigkeit
Wirksamkeit	gut		mittel	gering

Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	safort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: Erschütterungsintensive Bauarbeiten können zeitlich so fixiert werden, dass sich die Anwohnerschaft weniger belästigt fühlt. (lange Mittags- und Nachtpausen).

Wirkung: Diese Massnahme beeinflusst folgende Faktoren positiv:

- *Einwirkungsdauer*
- *Häufigkeit*
- *Tätigkeit* (schlafen, arbeiten, etc.)

Wirksamkeit: Diese Massnahme ist psychologisch sehr wirksam und wird dementsprechend oft angewendet.

Dimensionierungsansätze Für die Erschütterungen sollten die gleichen Ruhezeiten eingehalten werden wie für Lärm.
Konkrete Ruhezeiten können aus den Baulärmverordnungen der Kantone entnommen werden.

10. Ändern der Erregerfrequenz

Art: Ort:	bei der Quelle	im Übertragungs-m.	beim Empfänger
organisat.			
betrieblich			
baulich			

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke				Geräte		Mensch	

Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirk-dauer	Häufig-keit

Wirksamkeit	gut	mittel	gering

Kosten	hoch	mittel	niedrig

Realisierung	safart	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: Geräte mit verstellbarer Drehzahl bieten die Möglichkeit, Resonanzstellen an umliegenden Gebäuden oder deren Bauteilen durch verändern der Betriebsfrequenz zu verlassen und somit die Schwingungsbelastung unmittelbar zu reduzieren. Diese Möglichkeit besteht vor allem bei Vibrationsgeräten. Nachteil ist, dass durch die Änderung der Drehzahl der optimale Arbeitspunkt meistens verlassen wird.

Wirkung: Erhöht oder verkleinert man die Betriebsfrequenz einer erschütterungsverursachenden (Bau-)Maschine, können ausgeprägte Resonanzstellen verlassen werden. Eine Erhöhung der Erregerfrequenz ist in der Regel wirkungsvoller als eine Reduktion.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist beschränkt, da einerseits nur kleine Betriebsfrequenzänderungen möglich sind und andererseits beim An- und Auslauf der Maschine die Resonanzstellen der umliegenden Bauwerke durchlaufen werden (vgl. Massnahme Nr. 8, Fig. 6.11).
Am wirkungsvollsten ist die Massnahme bei Empfängersystemen mit geringer Dämpfung, da bereits kleine Erregerfrequenzverschiebungen deutliche Amplitudenreduktionen zeigen.
Allerdings können dann wieder andere Bauteile (Wände, Decken, Einrichtungen) oder andere Räume und Gebäude zu Resonanzschwingungen angeregt werden!
Der Vorteil dieser Massnahme liegt in der unmittelbaren Kontrolle der Wirksamkeit einer Betriebsfrequenzänderung.

Dimensionierungsansätze 6.12) Frequenzerhöhung auf mindestens $\sqrt{2}$ der Resonanzfrequenz (Fig.

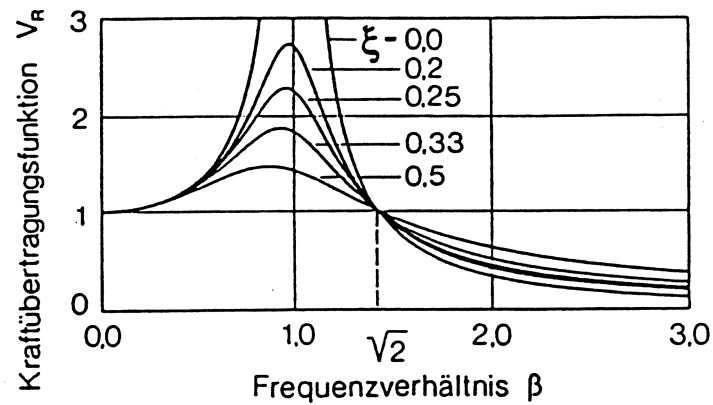


Fig. 6.12, Kraftübertragungsfunktionen für verschiedene Dämpfungsmasse (vgl. Grundlagen Seite 7 ff)

Beispiele: Beispiele von Geräten verstellbarer Betriebsfrequenzen:

- Verdichtungsgeräte [1]:

Vibratoren mit zweistufiger Frequenz- und Amplituden-Verstellung
Vibratoren mit automatischer Frequenzregelung

Literatur: [1] Theiner, J.; 'Die Devise heisst immer besser': Tiefbau, Ingenieurbau, Strassenbau; Heft 8/92, Seite 579..584

11. Strassenbelagserneuerungen

Art: Ort:		bei der Quelle		im Übertragungs-m.		beim Empfänger	
organisat.							
betrieblich							
baulich							

Einsatz		vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger		Bauwerke			Geräte			Mensch	

Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirk-dauer		Häufig-keit	
Wirksamkeit		gut				mittel			gering

Kosten		hoch		mittel		niedrig	
Realisierung		sofort		mittelfristig		langfristig	

Beschreibung: Vorbeifahrende Fahrzeuge verursachen Stösse, welche auf Unebenheiten und Diskontinuitäten im Strassenbelag zurückzuführen sind. Solche Stösse können Erschütterungen und Lärm erzeugen. Durch eine glatte Strassendecke - hierzu gehören auch Schachtdeckel und Brückenfugen, welche auf gleicher Höhe wie die Strassendecke liegen - können diese Stösse reduziert werden.

Die Belastungsänderung des Untergrundes durch das Fahrzeuggewicht erzeugt Deformationen, welche aus der Sicht eines festen Beobachters als dynamische Belastung wahrgenommen wird. Diese bei jeder Fahrzeugdurchfahrt periodisch erzeugte elastische Verformung kann in unmittelbar angrenzenden Gebäuden kleinere Schäden infolge Verzerrungen (differentiellen Setzungen) verursachen. Mittels einer möglichst starren Fahrbahnplatte können die punktförmigen Fahrzeuglasten auf eine grössere Fläche verteilt und während der Fahrzeugdurchfahrt mehr oder weniger unverändert gehalten werden.

Massnahme	Wirkung
glatte Strassendecke	Reduktion von Stössen
starre Fahrbahnplatte	Verteilung der punktförmigen Fahrzeuglast auf grössere Fläche

Wirkung:

- glatte Strassendecke:
Die Ursache von Stossbelastungen wird entschärft.
- starre Fahrbahnplatte:
Die Verteilung der punktförmigen Fahrzeuglast auf eine grössere Fläche verringert die Sohlspannungen, und somit die Erregerspannungen zwischen Fundament und Untergrund. Zudem bleibt während der Vorbeifahrt eines Fahrzeuges auf der gesamten Länge der starren Fahrbahnplatte diese Erregerspannung mehr oder weniger konstant, so dass die dynamische Wirkung der vorbeiwegten Fahrzeuglast abgemindert wird.

Wirksamkeit: Glatte Strassendecken sind relativ leicht herzustellen und die Wirksamkeit kann erheblich sein. Eine genügend grosse, starre Fahrbahnplatte herzustellen ist hingegen sehr aufwendig.

Dimensionierungsansätze Relevante Erschütterungen im Strassenverkehr werden vorwiegend von schweren Fahrzeugen wie LkW und Bussen verursacht. Auf einer glatten Strasse kann der Schwerverkehr keine unmittelbaren Erschütterungsschäden verursachen. Die gemessenen Erschütterungen liegen meist unter 1 mm/s. Selbst Setzungen durch plastische Deformationen (Einrütteln des Untergrundes) sind bei glatten Strassen unwahrscheinlich.

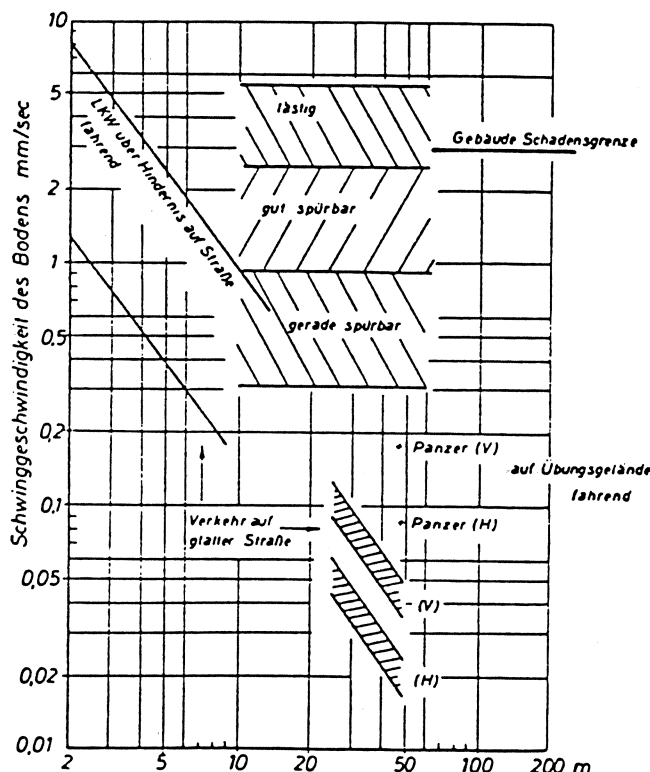
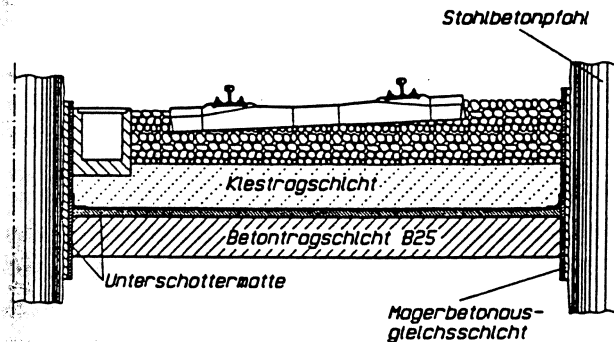


Fig. 6.13 [1]
Schwinggeschwindigkeit (gemessen) des Bodens in verschiedenen Abständen von einer Strasse beim Vorbeifahren schwerer Lastkraftwagen und Omnibussen:
V: vertikale Bodenschwingung
H: horizontale Bodenschwingung in Richtung der Strasse

Literatur:

- [1] Reiher, H.; v. Soden, D.; 'Beurteilung von Erschütterungen'; Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser und Grundbau; Berlin

12 . Erschütterungsreduktion beim Schienenoberbau



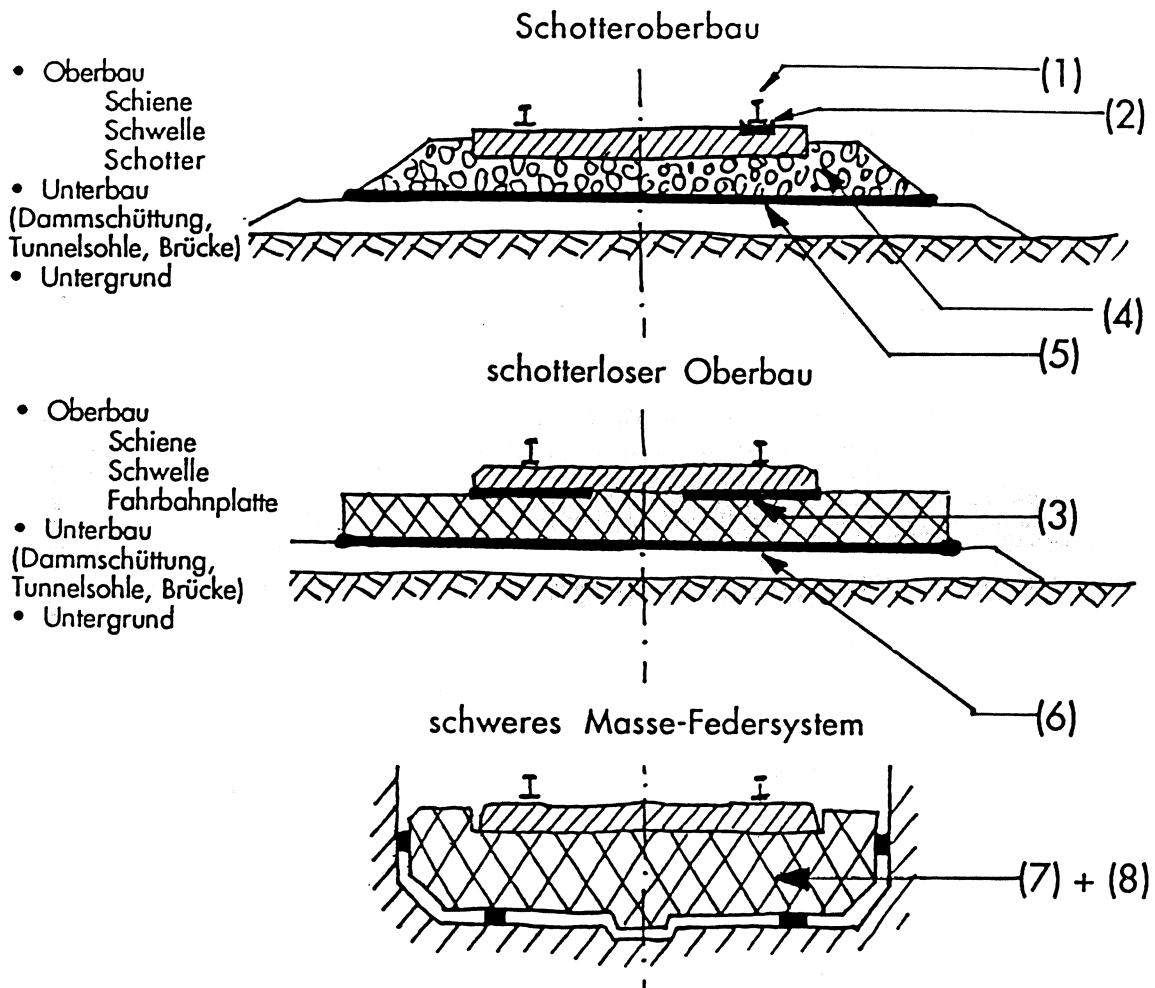
Art: Ort:		bei der Quelle		im Übertragungs-m.		beim Empfänger			
organisat.									
betrieblich									
baulich									
Einsatz		vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger		Bauwerke			Geräte		Mensch		
Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirk-dauer		Häufig-keit	
Wirksamkeit		gut		mittel		gering			
Kosten		hoch		mittel		niedrig			
Realisierung		sofort		mittelfristig		langfristig			

Beschreibung: In den letzten Jahren sind vor allem für Untergrund- und Stadtbahnen eine grosse Anzahl baulicher Erschütterungs- und Körperschallschutzmassnahmen entwickelt worden. Diesen Massnahmen ist gemeinsam, dass sie durch zusätzliche elastische Bettung des Geleiseoberbaus eine Tiefenabstimmung, bzw. Frequenzabstimmung und damit eine erhöhte Erschütterungsdämmung anstreben.

Die gebräuchlichsten Systeme sind:

Nr. System	Dämmleistung > 40 Hz in dBv
(1) Schienenfahrspiegel (Riffel) *	3...6
(2) hochelastische Schienenlagerung auf Schwellen	5...10
(3) elastischer Schwellenschuh	5...10
(4) Variation der Schotterbetthöhe bzw. Einfluss des Schotteralters	3...6
(5) Unterschottermatten	5...20
(6) Fahrbahnplatte auf Gummimatte betoniert	15...25
(7) Schweres Masse-Federsystem in Elementbauweise	> 20
(8) Schweres Masse-Federsystem mit durchgehend betoniertem Schottertrog	> 20
* keine eigentliche Frequenzabstimmung	

Anordnung der verschiedenen Dämmmassnahmen:



Wirkung:

Die durch eine fahrende Zugkomposition erzeugten Schwingungen werden von den Geleisen über den Oberbau auf den Untergrund und von dort in die Umgebung übertragen.

Die Frequenzverhältnisse der einzelnen schwingfähigen Oberbauteile bestimmen, ob die Schwingungen verstärkt oder abgemindert werden. Durch die zusätzliche elastische Bettung kann die Grundeigenfrequenz des Oberbauteiles herabgesetzt werden, wodurch die Abstimmungsfrequenz verkleinert wird. Dies hat zur Folge, dass bei der an und für sich breitbandigen Anregung der Schiene Schwingungen oberhalb dieser Bauteileigenfrequenzen deutlich reduziert werden (Fig. 2.5, Seite 8).

Wirksamkeit:

In den höheren Körperschall-Frequenzbändern (ab ca. 40 Hz) zeigen diese Massnahmen sehr gute Wirksamkeit (vgl. Dämmleistungswerte (Pegelminderung) gemäss vorangegangener 'Beschreibung'). Diese Reduktion muss aber meistens mit einer Verschlechterung bzw.

Schwingungsverstärkung im niederen Frequenzbereich erkaufte werden. Folglich bringt die zusätzliche elastische Bettung eine deutliche Verbesserung der Körperschallsituation, hingegen kann sich die Erschütterungssituation teilweise verschlechtern. In diesem Fall ist auf eine genügende Dämpfung zu achten.

Bei Verkehrsanlagen liegen allerdings die reinen Erschütterungsimmissionen auch ohne Massnahmen gewöhnlich im zumutbaren Bereich, weshalb eine Verschlechterung zugunsten der Körperschalleinwirkung in den meisten Fällen vertretbar ist. Probleme mit tieffrequenten Erschütterungen treten dann auf, wenn die Oberbau-Eigenfrequenzen und Eigenfrequenzen betroffener Bauteile (Gebäudedecken) nahe beieinander liegen. Dies ist vor allem bei Holzbauweise oder leichter Skelettbauweise der Gebäude anzutreffen.

Nachfolgend werden die einzelnen Möglichkeiten kurz beschrieben und Erfahrungswerte für die maximale Dämmleistung bzw Pegelmin- derung angegeben:

Systeme:

(1) Schienenfahrspiegel

Riffeln und Wellen, Isolierstösse, Weichen und Kreuzungen sind einige der Hauptursachen starker Erschütterungen bei Schienenanlagen. Die Pflege des Schienenfahrspiegels kann die Impulspegel spürbar reduzieren. Als Möglichkeit bieten sich hochfeste Schienen oder Rifflex-Schienen an. In kritischen Fällen sollten an Weichen und Kreuzungen bewegliche Herzstücke vorgesehen werden. Auf kritischen Streckenabschnitten besteht auch die Möglichkeit, den Unterhalt am Schienenfahrspiegel zu intensivieren, das heisst die Schienenoberfläche in kurzen Abständen durch Schleifen zu glätten (vgl. auch Massnahme Nr. 2)

(2) hochelastische Schienenlagerung

Auf dem Markt sind mehrere Varianten von hochelastischen Schienenbefestigungen vor allem für Achslasten bis zu 160 kN, wobei die Entwicklung noch im Gange ist. Die "Weichheit" wird begrenzt durch die Gestaltfestigkeit der Schiene und bei seitenweichen Befestigungen von der betriebssicherheitsmässig erträglichen Spurerweiterung und Stufenbildung im Falle eines Schienenquerbruchs. Die Anwendung findet sich vor allem bei Rillenschienen (Strassenbahnen)

(3) elastischer Schwellenschuh

Diese Möglichkeit bietet sich vor allem bei schotterloser Gleislagerung in Tunneln und auf Brücken an. Die meist aus Beton bestehenden Schwellen werden mit einem Gummischuh elastisch ummantelt und in die Fahrbahnplatte einbetoniert.

(4) Variation der Schotterbetthöhe bzw. des Schwellenabstandes

Die normale Schotterbetthöhe beträgt 30 cm zwischen Schwellenunterkante und Planum bzw. Tunnelsohle. Dämmungsmässig bringt eine Erhöhung über 30 cm nicht viel, wohl aber ergibt eine Verringerung eine spürbare Pegelerhöhung. Zwischen einem frisch durchgearbeiteten Normal-Schotterbett und einem nach etwa 1 Mio Leistungstonnen liegt eine Verschlechterung von 3 bis 6 dBv [2]. Die Oberbaupflege kann folglich die Körperschallsituation beeinflussen.

Gemäss [3] bieten relativ grosse Stützpunktabstände (Schwellenabstände) körperschalltechnische Vorteile.

(5) Unterschottermatten

Es werden Matten unterschiedlicher Bauarten angeboten:

- Gummimatten mit innen- oder aussenliegendem Profil
- einschichtige und mehrschichtige Matten
- Geflechte aus Streifen von Altpneus
- Matten aus zelligen Werkstoffen

Hochleistungsfähige Unterschottermatten bringen heutzutage bereits ab etwa 25 Hz eine Verbesserung. Bei Verwendung von Unterschottermatten wirkt sich übrigens eine grössere Schotterbetthöhe (>30 cm) positiv aus; so bringen 60cm Schotter auf einer hochleistungsfähigen Unterschottermatte wirksame Dämmwirkung ab etwa 20 Hz [2]

(6) Fahrbahnplatte auf Gummimatte betoniert

Dieses System wird bei schotterlosen Gleislagerungen angewendet, und entspricht eigentlich der oben beschriebenen Massnahme mit dem Unterschied, dass die Matten nicht zwischen Schotter und Unterbau, sondern unter die betonierte Fahrbahnplatte gelegt wird. Damit wird der Oberbau vom Unterbau entkoppelt. Dieses System entspricht grundsätzlich einem leichten Masse-Feder-System. Dieses System benötigt zwischen Tunnelsohle und Schienenoberkante bei einer Vollbahn etwa 65 cm Bauhöhe.

(7) und (8) Schweres Masse-Feder-System

Diese Massnahme ist in der Regel die wirkungsvollste, aber auch die technisch und kostenmässig aufwendigste Methode.

Ausführungsbeispiele existieren

- in schotterloser Form
- mit schottergelagertem Gleisrost (Schottertrog)
- mit Einzel-Fertigteilen (Elementbauweise)
- mit durchgehender Ortsbetonplatte (Schottertrog oder schotterlos).

Als Bauhöhe Schienenoberkante/Tunnelsohle wird je nach System 65 cm bis 100 cm benötigt.

Bei einer richtigen Abstimmung eines Masse-Feder-Systems sind Abstimmungsfrequenzen von 8 bis 12 Hz machbar.

Die einwandfreie Funktion eines Masse-Federsystems hängt sehr wesentlich von der im Hinblick auf die Biegeeigenfrequenzen der Gleis-tragplatten richtigen konstruktiven Durchbildung sowie von der exak-ten Bau- und Montageausführung (Vermeidung von Körperschallbrük-ken) ab.

Dimensionierungsansätze Eine erste Abschätzung der maximal erreichbaren Dämmleistung (DL) kann nach folgender Formel gefunden werden:

$$DL = 20 \log \left| 1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right| \quad [\text{in dB(v)}]$$

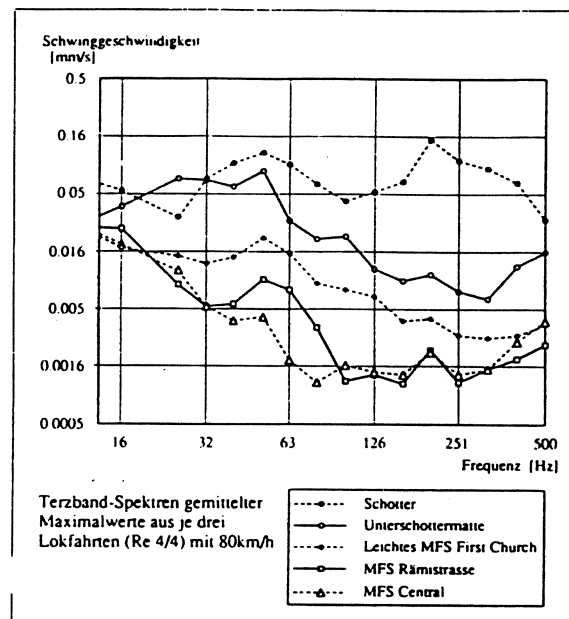
ω := Erregerfrequenz mit bedeutendem Lastanteil

ω_0 := Eigenfrequenz des Systems

(vgl. Kap. 2.2 Grundlagen Seite 4 ff und Massnahme Nr. 20 Passiv-isolierung Seite 130)

Beispiele:

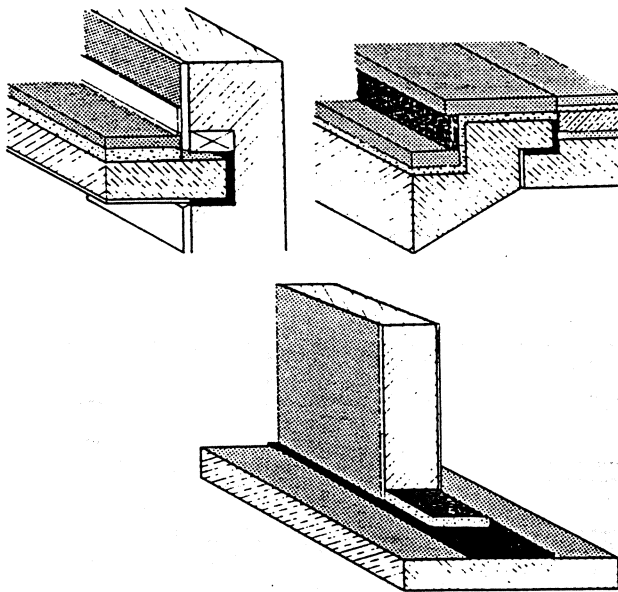
Ergebnis einiger Abnahmemessungen an verschiedenen Punkten des Zürcher S-Bahn Netzes mit verschiedenen erschütterungsreduzierenden Massnahmen. Deutlich ist die Wirkung der verschiedenen Dämm-massnahmen in den höheren Frequenzbereichen festzustellen [1].



Literatur:

- [1] Rubi H.P., ;Rutishauser, G.; 'S-Bahn-Technik, Gleisoberbau und Körperschall-schutzmassnahmen'; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein Heft Nr. 29, 18. Juli 1991, (Seite 701-706)
- [2] Eisenmann, J.; Steinbeisser, L.; Deischl, F.; 'Körperschallemission bei S-Bahnen in Tunnellage', Grossprüfstands-Messungen und Empfehlungen für die Praxis, (RU 147)
- [3] Braitsch, H.; 'Das 'Kölner Ei' (Oberbau 1403/c)'; Sonderdruck aus V + T, Hefte 7,8,10 und 12/1979; Erich Schmidt Verlag, Bielefeld

13. Fugen



Art:	Ort:									
organisat.										
betrieblich										
baulich										
Einsatz		vorsorglich					bei Eintritt			
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8	
Empfänger		Bauwerke			Geräte			Mensch		
Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirkdauer		Häufigkeit		
Wirksamkeit		gut			mittel			gering		
Kosten		hoch			mittel			niedrig		
Realisierung		sofort			mittelfristig			langfristig		

Beschreibung: Vermeiden von Schwingungsübertragungsbrücken (Seite 33).
 Abtrennen einzelner Bauwerksteile zur Verhinderung der Schwingungs- und Körperschallübertragung.
 Diese Massnahme kann aber zu Nachteilen in anderen Aspekten führen; das Verhalten bei Erdbeben kann sich beispielsweise verschlechtern.

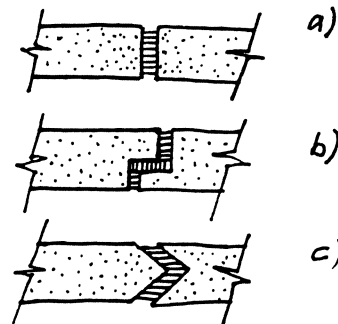
Wirkung: Entkoppelung der Quelle vom Empfänger.

Wirksamkeit: Fugen sind in erster Linie zur Vermeidung von Körperschallbrücken geeignet. Körperschall kann mittels Fugen wirksam vermieden werden, doch genügen schon kleinere starre Verbindungen (ausgeflossener Zement, Holzkeile, u.a.) um die Wirksamkeit beträchtlich zu verringern.

Dimensionierungsansätze minimale Fugenbreite: $\geq 4 \text{ cm}$
 Verfüllung nur mit sehr weichen Materialien (kein Polystyrol expandiert = "Styropor")

Fig. 6.14 :
 mögliche Fugenkonstruktionen:

- a) nur Normalkraftübertragung,
- b) einseitige Querkraftübertragung und
- c) zweiseitige Querkraftübertragung möglich.



14. Bodenschlitze / Störkörper

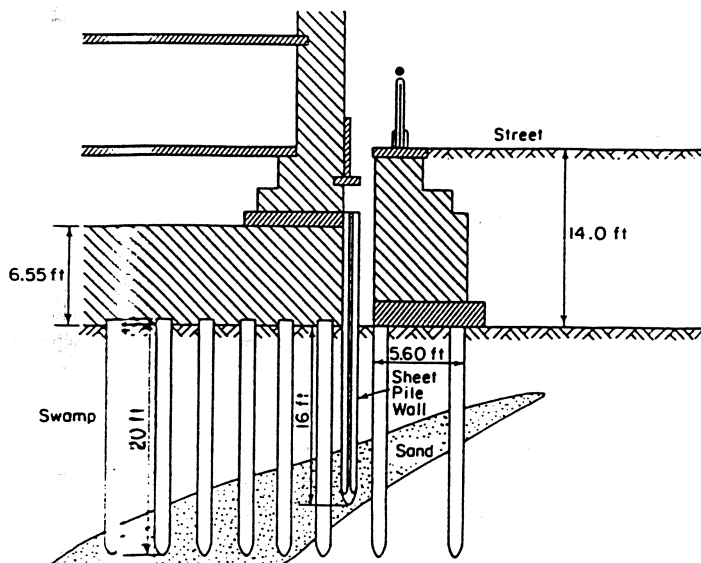


Fig. 6.15, Abschirmung eines Gebäudes gegen verkehrsinduzierte Erschütterungen [1]

Art:	Ort:	
organisat.		
betrieblich		
baulich		

bei der Quelle	im Übertragungs-m.	beim Empfänger

Einsatz	vorsorglich			bei Eintritt				
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	

Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirk-dauer	Häufig-keit

Wirksamkeit	gut	mittel	gering

Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	sofort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: Der Grossteil der an der Oberfläche erzeugten Schwingungs- oder Stossenergie wird durch Oberflächenwellen (Rayleigh-Wellen) übertragen. Es besteht die Möglichkeit, mittels Bodenschlitzen oder ähnlichen Baukörpern Objekte gegen Erschütterungswellen, insbesondere gegen R-Wellen abzuschirmen. Die Wirksamkeit solcher Schlitze wurde experimentell und rechnerisch bereits mehrfach untersucht.

Folgende Möglichkeiten kommen in Frage:

Baumassnahme	Bemerkung
• offene Bodenschlitze [1]	am wirksamsten, aber in der Baupraxis kaum oder nur kurzfristig standfest
• bentonitgestützte Bodenschlitze [2]	"
• geschlossene Bodenschlitze [2]	massive (Beton) oder weiche Schlitze möglich
• oberflächennah liegende Körper [5]	..grosser Steifigkeit (steife Platten)
• Bohrpfehlwände [4]	
• Störkörper aller Art [3]	z.B hochliegendes Tunnel
• Spezialverfahren [6]	Gasmatten (vgl. offene Schlitze)

Wirkung:

Die Abschirmwirkung von Bodenschlitzen und Störkörpern beruht in erster Linie auf der Reflexion und Umlenkung der durch die Oberflächenwellen herangeführten Energie in die Tiefe mit dem Ziel, den transmittierenden Anteil der Wellen insbesondere der R-Welle zu reduzieren. Reflexionen und Refraktionen entstehen an Grenzflächen zweier Medien, welche aus Boden-Boden, Boden-Flüssigkeit oder Boden-Luft bestehen können (vgl. Wellenausbreitung Seite 9 ff und Kap. 2.4.3 Ausbreitung Seite 30 ff)

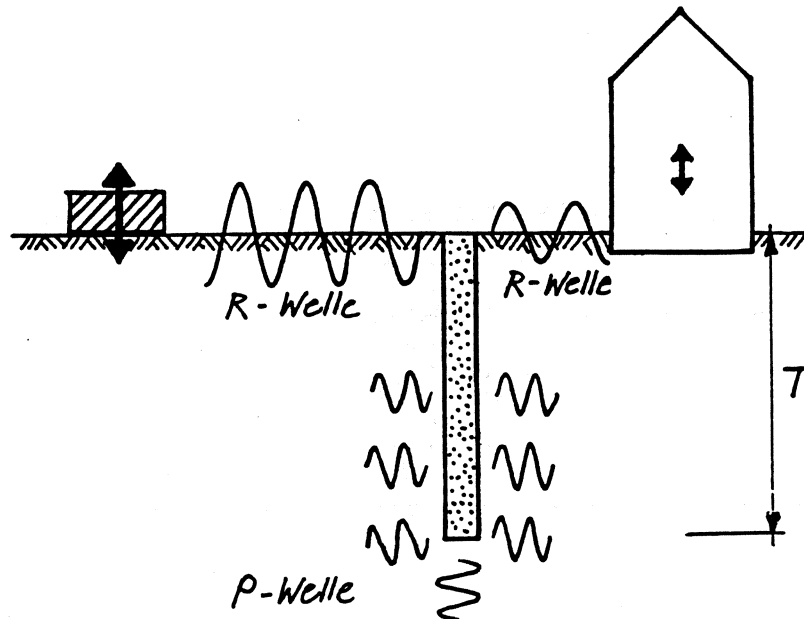


Fig. 6.16, Reflexion und Umlenkung der herangeführten R-Welle in die Tiefe

Wirksamkeit: Zur Beschreibung der Abschirmwirksamkeit eignet sich der Amplitudenreduktionsfaktor A_r , der dem prozentualen Anteil der eintreffenden Wellenamplitude, welche den Bodenschlitz durchläuft, entspricht. A_r entspricht einem Mittelwert im oberflächennahen Bereich hinter dem Störkörper. (Bsp. $A_r = 0,4$ entspricht 60% Amplitudenreduktion)

Es wird unterschieden zwischen der Abschirmung im Nahfeld- (aktive Abschirmung = Bodenschlitz unmittelbar bei der Quelle) und der Abschirmung im Fernfeld (passive Abschirmung = Bodenschlitz beim Empfänger).

Praktisch dürfte kaum ein Reduktionsfaktor unter 0,25 erreicht werden können.

Wirksamkeit der verschiedenen Möglichkeiten im Vergleich:

kleinstmöglicher Amplitudenreduktionsfaktor A_r			
0.25		0.50	
offener	-----> bentonitgefüllter	-----> massiver	-----> Bohrpfahlreihe
Nahfeld	----->		Fernfeld
vertikale Schwingungen	----->		horizontale Schwingungen

Dimensionierungsansätze

Die Verteilung der Partikelgeschwindigkeit einer Rayleigh-Welle über die Tiefe ist abhängig von der Wellenlänge beziehungsweise von der Frequenz. Je tiefer die Frequenz der Welle, desto grösser ist die Einflusstiefe der Oberflächenwelle (vgl. Fig. 2.7, Seite 10). Folglich ist bei breitbandiger Anregung immer die tiefste Frequenz massgebend für die Dimensionierung der Schlitztiefe. Dieser Einfluss der Anregungsfrequenz wird in den folgenden Dimensionierungsansätzen implizit berücksichtigt durch die normalisierten geometrischen Abmessungen mit der R-Wellenlänge λ_R .

$$\lambda_R = v_R / f$$

wobei v_R die Ausbreitungsgeschwindigkeit der R-Wellen und f die tiefste noch relevante Frequenz darstellt. Ausbreitungsgeschwindigkeiten für verschiedene Böden können aus Fig. 6.17 und aus Tab. 6.4 abgeleitet werden.

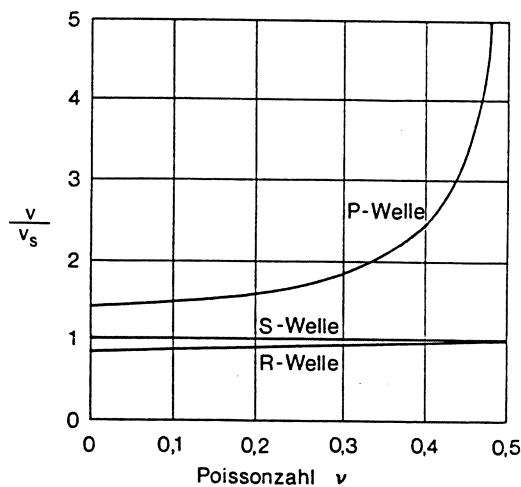


Fig. 6.17, Vergleich der P-, S- und R-Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in Funktion der Poissonzahl ν [4].

Bodenart	v_p [m/sec]
Deckschichten, locker gelagert, verwittert, nicht gesättigt, (Tiefe 3 bis 6 m)	200...800
Schotter (Kiessand), nicht gesättigt	400...800
Schotter, grundwassergesättigt	1300...2000
verkitteter Schotter	1800...2500
Seebodenlehm	700...1300
Gehängelehm, nicht gesättigt	300...100
Moränen	1200...2400
Molasse- Mergel und Molasse-Sandstein, weich	900...1800
Mergel, nicht verwittert	1800...3200
Kalk	3000...6000

Tab. 6.4, Richtwerte von Ausbreitungsgeschwindigkeiten der P-Wellen einiger wichtiger Boden- und Gesteinsarten, aus [4].

Nachfolgend werden einige Dimensionierungskriterien für verschiedene Systeme angegeben.

a) offene/bentonitgefüllte* Schlitz:

Woods [1] empfiehlt aufgrund von Versuchen:

- aktive Abschirmung (im Nahfeld)
für eine maximale Amplitudenreduktion $A_r = 0.25$ innerhalb eines Bereiches zwischen der äusseren Kante des Schlitzes und einem Kreis mit Radius $R \approx 10 \lambda_R$ sollte die Schlitztiefe T ungefähr $0.6 \lambda_R$ gewählt werden.
- passive Abschirmung (im Fernfeld)
für eine maximale Amplitudenreduktion $A_r = 0.25$ innerhalb eines halbkreisförmigen Bereiches hinter dem Schlitz mit Radius der halben Schlitzbreite, $R \approx B/2$ und Mittelpunkt in der Mitte des Schlitzes: Für Schlitz in einer Entfernung von der Quelle zwischen $2 \lambda_R$ und $7 \lambda_R$ ($2 \lambda_R \leq R \leq 7 \lambda_R$) sollte die Schlitztiefe T ungefähr $1.4 \lambda_R$ betragen. Die normierte Querschnittsfläche α ($\alpha = T/\lambda_R \times B/\lambda_R = TB/\lambda_R^2$) sollte proportional mit der Entfernung zur Quelle R wachsen (Für $R = 2\lambda_R \Rightarrow \alpha \approx 2.5$, für $R = 7\lambda_R \Rightarrow \alpha \approx 6$).
- Für bentonitgefüllte Schlitz gelten ungefähr ähnliche Verhältnisse (Dolling [2])

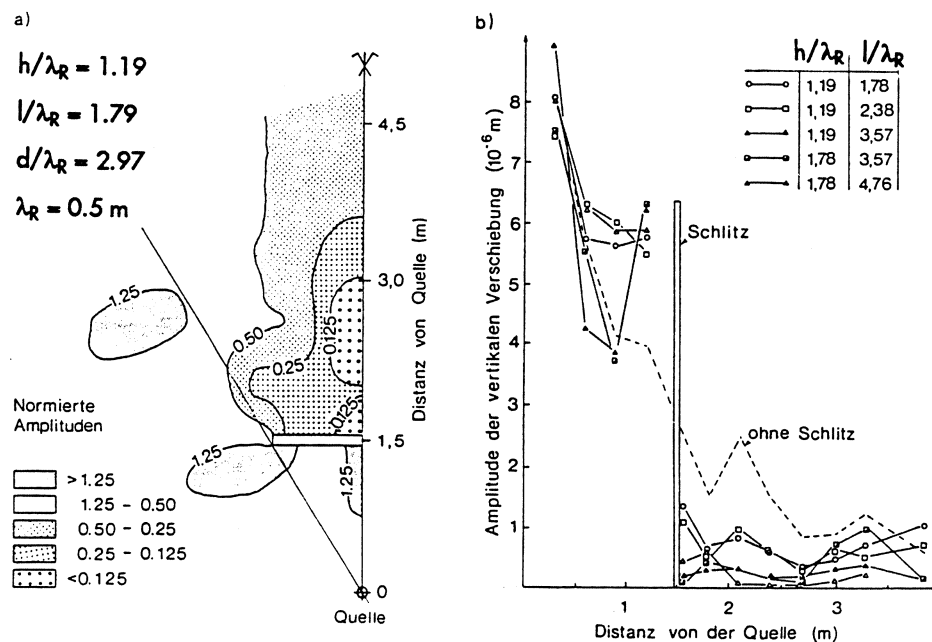


Fig. 6.18, Abschirmwirkung von offenen Schlitz; a) Normierte Amplituden, h = Schlitztiefe, l = Schlitzlänge, d = Distanz von der Quelle, λ_R = R-Wellenlänge (λ_R); b) Vertikale Verschiebungsamplitude in Abhängigkeit der Entfernung (nach Woods, 1968)

b) geschlossene, massive (Beton-) Schlitz und Störkörper [3]

- Angaben gelten für Betonschlitz und -störkörper in rolligem Material
- Abschirmwirkung abhängig von der normierten Querschnittsfläche $\alpha = (H \times B)/\lambda_R^2$ (Fig. 6.18)
- Einfluss der normierten Entfernung $r = R/\lambda_R$ zwischen oberflächlich liegende Quelle und Bodenschlitz (Fig. 6.19)
- Abschirmwirkung nimmt mit wachsendem Abstand hinter Bodenschlitz ab. Wirksame Zone $\approx 10 \lambda_R$

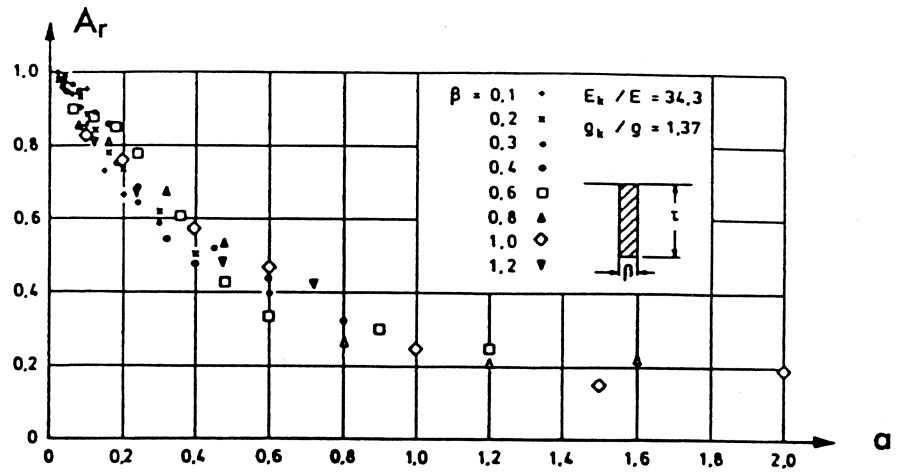


Fig. 6.19,

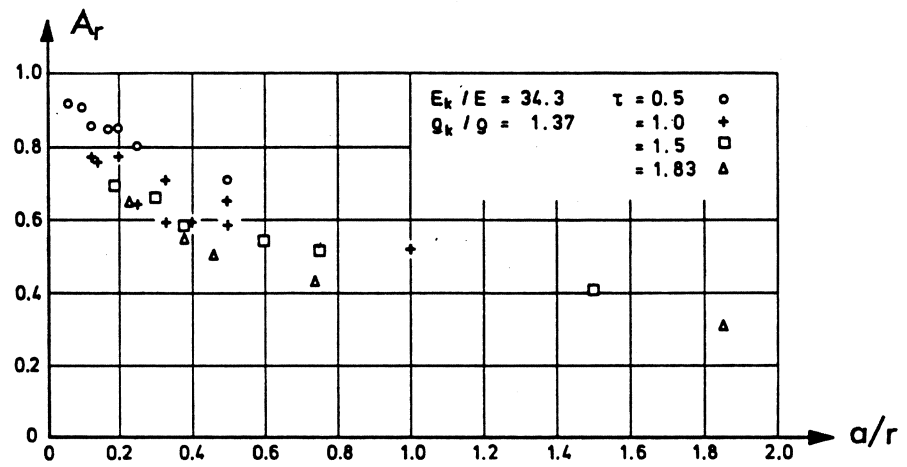


Fig. 6.20,

c) Bohrpfehlreihe [4]:

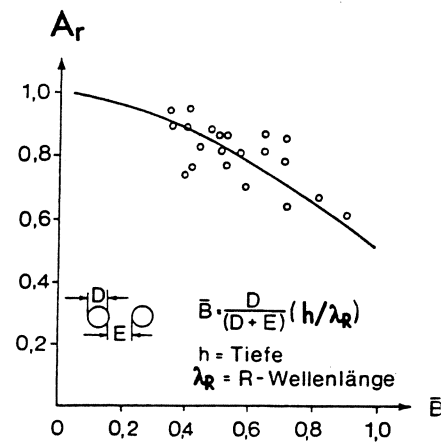


Fig. 6.21

Beispiele:

Im Zuge des Ausbaus einer Bahnstrecke in Düsseldorf mussten die Geleise dichter an ein bestehendes Wohngebäude verlegt werden [6]. Um das ursprüngliche Erschütterungsniveau im Gebäude wiederherzustellen, wurde eine 8 m tiefe und ca. 40 m lange Abschirmwand ausgeführt. Diese Wand besteht aus einem neuartigen System aus luftgefüllten Kunststoffkammern - ähnlich einer Luftmatratze - welche in einen im Schlitzwandverfahren erstellten Bodenschlitz einbetoniert wurde. Die Wirkungsweise dieser Abschirmwand ist vergleichbar mit einem offenen Bodenschlitz. Direkt hinter der Wand konnten Amplitudenreduktionsfaktoren A_r zwischen 0.4 und 0.5 gemessen werden. Während der gesamten Bauzeit konnte der Bahnverkehr ohne Einschränkungen weitergeführt werden.

Literatur:

- [1] Richart, F.E., Woods, R.D., Hall, J.R.; 'Vibrations of Soils and Foundations'; Prentice-Hall, Inc.; New Jersey 1970
- [2] Dolling, H.J.; 'Schwingungsisolierung von Bauwerken durch tiefe, auf geeignete Weise stabilisierte Schlitz', Sonderdruck aus VDI-Berichte 88, S. 3741
- [3] Haupt, W.; 'Verhalten von Oberflächenwellen im inhomogenen Halbraum mit besonderer Berücksichtigung der Wellenausbreitung', Karlsruhe 1978
- [4] Studer, J.; Ziegler, A.; 'Bodendynamik; Grundlagen, Kennziffern, Probleme'; Springer-Verlag, 1986
- [5] Journal of Geotechnical Engineering:
Vol. 117 No. 1 Jan. 1991 p 67 - 88
Vol. 117 No. 4 Apr. 1991 p 616 - 636
- [6] Schiffer, W.; 'Neues Verfahren zur Abschirmung von Erschütterungen'; Dokumentation D079, Vibrationen; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA); 1991, S. 63..66

15. Voraushub/Vorbohren

Art:	Ort:									
organisat.		bei der Quelle		im Übertragungs m.				beim Empfänger		
betrieblich										
baulich										
Einsatz		vorsorglich				bei Eintritt				
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8	
Empfänger		Bauwerke			Geräte			Mensch		
Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirkdauer		Häufigkeit		
Wirksamkeit		gut		mittel		gering				
Kosten		hoch		mittel		niedrig				
Realisierung		sofort		mittelfristig		langfristig				

Beschreibung: Böden in der Schweiz zeigen oft eine ausgeprägte Horizontalschichtung mit einer harten Deckschicht aus Auffüllung oder Schotter oberhalb weicher Lockergesteine.

Wird auf einer Baustelle eine solche Situation angetroffen, können starke Erschütterungen bzw. deren Ausbreitung infolge Durchfahren dieser harten Deckschichten allenfalls durch einen Voraushub oder durch Vorbohren umgangen werden. Diese Massnahme ist vor allem bei Erschütterungsproblemen auf Baustellen infolge Rammarbeiten zu prüfen.

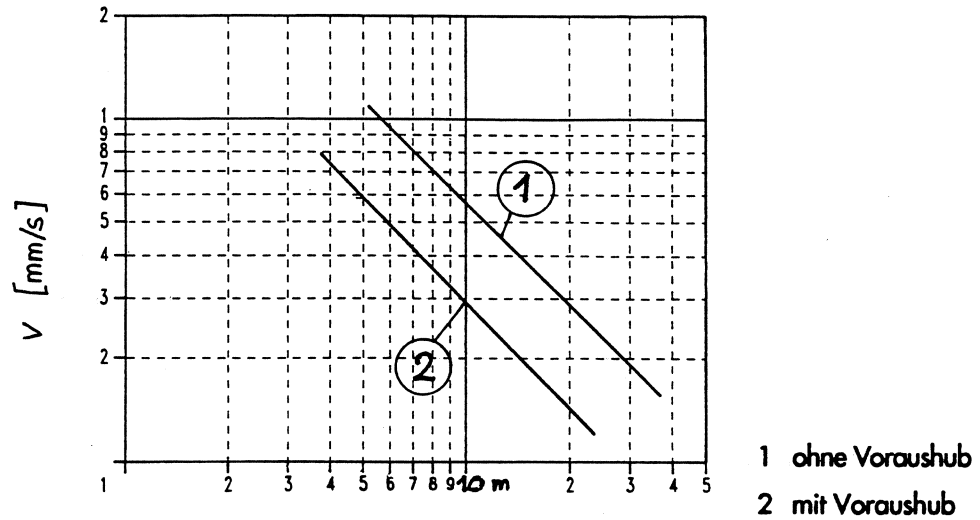
Beim Durchfahren von harten Schichtpaketen, welche zwischen weichen Böden gelagert ist (zB. Liasbänke zwischen mergeligen Schichten), liegen ähnliche Verhältnisse vor. Solche Felsbänke können Schwingungen sehr weit leiten.

Wirkung: Rein physikalisch betrachtet wird die Ankoppelung des Schwingungserreger (Bohle) an Bodenschichten mit guten Wellenleitereigenschaften vermieden (Seite 33).

Wirksamkeit: Das Mass der Erschütterungsreduktion hängt sehr stark von den tatsächlich vorliegenden Untergrundverhältnissen ab. Ein Voraushub ist eine einfache Massnahme, welche sehr wirksam sein kann (Fig. 6.22).

Beispiele:

Fig.6.22, Gemessene Erschütterungsreduktion durch einen Voraushub in einer Baustelle. [1]



Literatur:

- [1] Bendel, H./Trombik, P.; 'Erschütterungen durch Baustellen und Verkehr - Prognosen, Messungen, Massnahmen'; Dokumentation D079, Vibrationen; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Seite 117..122, 1991

16. Information / Orientierung

Art:	Ort:			bei der Quelle		im Übertragungs-m.		beim Empfänger	
organisat.									
betrieblich									
baulich									

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	

Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirk-dauer	Häufig-keit
---------	----------	--------	---------------	-------------

Wirksamkeit	gut	mittel	gering
-------------	-----	--------	--------

Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	sofort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: Es ist bekannt, dass psychologische Faktoren die Erschütterungsempfindlichkeit des Menschen massgeblich beeinflussen (Kap. 2.5.4, Seite 41 ff). Die vorsorgliche Information und Orientierung von betroffenen Personen (Anwohner, Arbeitspersonal, Behörden etc.) bei erwarteten Erschütterungsproblemen ist speziell bei zeitlich begrenzten Immissionen (v.a. Baustellen, Sprengungen) eine ausgezeichnete Möglichkeit, Probleme zu verhindern.

Wirkung: Diese Massnahme beeinflusst folgende Faktoren, welche das Wohlbefinden des Menschen massgeblich beeinflussen können, positiv:

- individuelle Charakteristiken (Erfahrung, Grundeinstellung, Überraschungseffekt)
- Umgebungsbedingung (Identifikation der Quelle)

In erster Linie wird die Akzeptanz erhöht.

Wirksamkeit: Der Erfolg dieser Massnahme ist gross, besonders wenn parallel dazu noch andere Massnahmen, wie beispielsweise die Fixierung von Baubetriebszeiten (Massnahme Nr 9) oder die Durchführung von Erschütterungsmessungen und Rissaufnahmen (Seite 76), getroffen werden. Der Eindruck der Anwohner, dass seitens des Verursachers von Erschütterungsimmissionen alles unternommen wird, die Vibrationsbelastung so gering wie möglich zu halten, wirkt sich positiv aus.

Beispiele: Vergleiche Fallbeispiel B Seite 70 ff

Literatur: [1] Griffin, M.J.; 'Handbook of Human Vibration'; Academic Press, London, 1990

[2] Rutishauser, G.; 'Erschütterungen und Körperschall infolge Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen'; Publikation für den 18. Weltstrassenkongress, Brüssel 1987

17. Dislozierung

Art:	Ort:								
organisat.		bei der Quelle				im Übertragungsm.		beim Empfänger	
betrieblich									
baulich									

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	
Wirkung	Frequenz		Stärke		Einwirkdauer		Häufigkeit	
Wirksamkeit	gut				mittel		gering	
Kosten	hoch				mittel		niedrig	
Realisierung	sofort				mittelfristig		langfristig	

Beschreibung: Bei übermässigen Erschütterungen besteht bei portablen Geräten die Möglichkeit, diese innerhalb von einem Raum oder Gebäude an Standorte geringerer Schwingungsintensitäten zu verschieben.

Eine weitere Massnahme, von welcher aber selten Gebrauch gemacht wird, besteht darin, betroffenen **Anwohnern** vorübergehend einen anderen Wohn- oder Arbeitsort beispielsweise in einem Hotel anzubieten.

Wirksamkeit: Diese Massnahme ist vor allem bei gefährdeten Geräten von praktischer Bedeutung.
Die Dislokation ist hingegen bei Personen nur bei sehr kurzen aber heftigen erwarteten Erschütterungsbelastungen angebracht.

18. Permanente Überwachung

Bild 2: Erschütterungsmess- und Überwachungsdispositiv

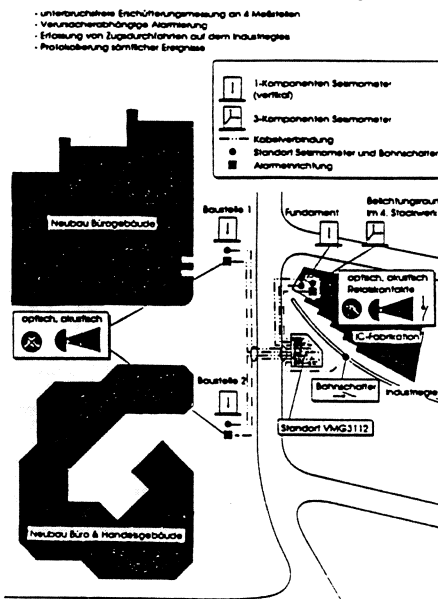


Fig. 6.23, Situationsplan zu Beispiel auf nächster Seite

Art: Ort:	bei der Quelle	im Übertragungs-m.	beim Empfänger
organisat.			
betriebl.			
baulich			
Einsatz	vorsorglich		bei Eintritt
Quellentyp	1	2	3
Empfänger	Bauwerke	Geräte	Mensch
Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirk-dauer
Wirksamkeit	gut	mittel	gering
Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	sofort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: Permanente oder periodische Überwachung in Form von Erschütterungsmessungen bei erschütterungsintensiven Bauarbeiten und prognostizierten kritischen Auswirkungen.

Vorgängig müssen Kriterien für zulässige Schwingungsgrößen festgelegt werden.

Wirkung: Erschütterungen, welche definierte Werte nicht überschreiten, werden bewusst zugelassen. Periodische oder sogar permanente Erschütterungsmessungen ermöglichen die Überwachung der Schwingungsbeanspruchung. Massnahmen zur Schwingungsreduktion oder zur Reduktion der Auswirkungen werden erst ergriffen, wenn die Überwachungsmessungen ein Überschreiten der zulässigen Schwingungsgrößen anzeigen.

Hinzukommt, dass sich ein Überwachungssystem auch psychologisch positiv auswirkt: Die Akzeptanz von betroffenen Personen gegenüber Erschütterungsimmissionen wird erhöht durch das Bewusstsein, dass die Einhaltung der zulässigen Erschütterungswerte objektiv überwacht wird. Zudem können Protokolle solcher Überwachungsmessungen die Grundlage bei der Beurteilung späterer Schadensforderungen bilden.

Wirksamkeit: Oft werden zulässige Erschütterungswerte nur kurz bei Spitzenauschlägen überschritten. Zudem wird die Schwingungsausbreitung von zahlreichen Faktoren beeinflusst, so dass die gemessenen Bodenerschütterungen stark schwanken. In Situationen bei welchen die Erschütterungsbelastung nicht eindeutig beurteilt werden kann, stellt die Installation eines Überwachungssystems eine wirtschaftliche Möglichkeit dar, das Risiko von Schäden und Produktionsstörungen infolge Vibrationen zu minimieren.

Dimensionierungsansätze Bei permanenter Schwingungsüberwachung sind hohe Anforderungen an das Mess- und Alarmsystem zu stellen. Es sind deshalb Spezialisten für die Installierung solcher Systeme beizuziehen.

Beispiele: Die Belichtung von integrierten Schaltkreisen, sogenannten Wafern in einer hochpräzisen Produktionsanlage war durch Erschütterungseinflüsse fabrikfremder Bauarbeiten und fabrikinterner Quellen gefährdet. Es wurde daraufhin eine permanente Erschütterungsüberwachung mit automatischer Alarmauslösung bei Überschreiten von festgelegten Schwingungskriterien eingerichtet. Mit diesem Alarmsystem wurde erreicht, dass die Produktion ungehindert fortgesetzt werden konnte. Bei Auslösung des Alarms wurden die soeben produzierten Wafer einer speziellen Qualitätskontrolle unterzogen. Die Zusatzkosten dafür trug der Verursacher [1].
(Vergleiche auch Fallbeispiel A Seite 64 ff)

Literatur: [1] Ermatinger, Ch.; 'Digitales Echtzeit-Vibrationsmessgerät für unterbruchsfreien Dauerbetrieb'; Dokumentation D079, Vibrationen; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA); 1991, S. 87..91.

19. Nutzungsbeschränkung

Art:	Ort:		
organisat.			
betrieblich			
baulich			

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke		Geräte			Mensch		

Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirkdauer	Häufigkeit

Wirksamkeit	gut	mittel	gering

Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	sofort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: Die Nutzung bestimmter empfindlicher Anlagen und Geräte kann auf die Erschütterungseinwirkung abgestimmt werden.
Dies kann auf vielfältige Art und Weise geschehen:

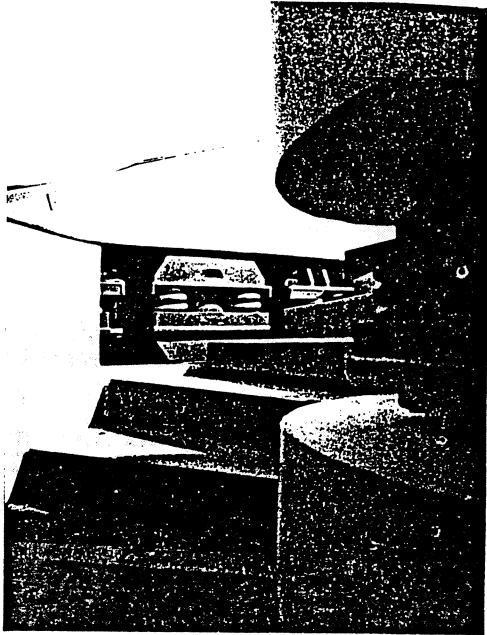
- Die Betriebszeiten koordinieren, das heisst Geräte und Anlagen benutzen, wenn keine Erschütterungen auftreten.
- Empfindlichkeitsgrenzen festlegen beziehungsweise Grenzwertgrößen definieren. Sobald diese überschritten werden, wird der Betrieb der Geräte bzw. die Produktion unterbrochen (vgl. auch Massnahme 18, Seite 127, 'Permanente Überwachung').

Wirkung: Da Erschütterungen meistens den einwandfreien Betrieb von Geräten beeinträchtigen, nicht aber die Geräte selbst beschädigen, genügt es, diese bei Erschütterungsimmissionen ausser Betrieb zu nehmen, vorausgesetzt diese Möglichkeit ist gegeben.

Wirksamkeit: Bei temporären Erschütterungseinwirkungen, welche ausschliesslich den Betrieb von empfindlichen Geräten beeinträchtigen oder die Produktionsqualität gefährden, ist eine solche Massnahme zu prüfen. Oft sind empfindliche Geräte, beispielsweise Messgeräte, nur teilweise im Einsatz.

Dimensionierungsansätze Kapitel 2.5.3, Geräte und Anlagen Seite 39 ff.

20. Passivisolierung



Art:	Ort:		bei der Quelle		im Übertragungs-m.		beim Empfänger	
organisat.								
betrieblich								
baulich								

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	

Wirkung	Frequenz	Stärke	Einwirk-dauer	Häufig-keit
---------	----------	--------	---------------	-------------

Wirksamkeit	gut	mittel	gering
-------------	-----	--------	--------

Kosten	hoch	mittel	niedrig
Realisierung	sofort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: Gebäude oder Geräte, welche durch den Untergrund oder den Unterbau zu Schwingungen angeregt werden, können durch die Zwischenschaltung von Isolatoren entkoppelt werden. Diese Massnahme nennt man auch passive Schwingungsisolierung. Die Passivisolierung von Maschinen kennt man bereits seit Jahrzehnten. Die elastische Lagerung von ganzen Gebäuden zur Schwingungs- und Körperschallisolierung hingegen wurde bisher vorwiegend aus Kostengründen noch wenig angewendet. (In Japan ist diese Möglichkeit jedoch populär für die Isolierung gegen Erdbebenanregung, 'base isolation').

Im Gegensatz zur Passivisolierung wird bei einer Aktivisolierung der benachbarte Bereich vor den Schwingungen am Ort der Entstehung (Quelle) geschützt. Beide Massnahmen entsprechen einer Frequenzabstimmung, die physikalischen Grundsätze sind für die Aktiv- und die Passivisolierung analog. Die bereits aufgeführten Massnahmen Nr.12,13 entsprechen im Grunde einer Aktivisolierung.

Als Isolatoren dienen vor allem Systeme aus Feder- und Dämpferelementen, wovon auf dem Markt unzählige Varianten existieren (Tab. 6.5).

Tab. 6.5, Feder(-Dämpfer)-Systeme und deren Abstimmungsfrequenzbereiche

Lagerung	System	Abstimmungsfrequenzbereich*
Flächenlagerung	Filzplatten	> ~20 Hz
	Korkplatten	> ~10 Hz
	Gummiplatten	10 bis 20 Hz
Einzellagerungen	Gummielemente	5 bis 20 Hz
	Stahlfedern (Schrauben-, Blatt-, Tellerfedern)	1 bis 8 Hz
	Luftfederungen	0.5 bis 5 Hz

* Je kleiner die Abstimmungsfrequenz, desto grösser die Dämmwirkung

Wirkung:

Mit Hilfe der Isolatoren kann die Eigenfrequenz des angeregten Schwingensystemes, also des Gebäudes oder des Gerätes verändert und somit eine Frequenzabstimmung möglich werden. Grundsätzlich ist eine Tiefen- oder eine Hochabstimmung möglich.

Tiefabstimmung:

Bei der Tiefabstimmung wird die Grundeigenfrequenz des Gebäudes oder des Gerätes unter die Anregungsfrequenz verkleinert. Je grösser der Abstand der Grundeigenfrequenz zur massgebenden Anregungsfrequenz, desto besser ist der Erfolg der Massnahme. Je grösser das Dämpfungsmass ξ , desto grösser muss der Abstand zwischen der massgebenden Anregungsfrequenz und der Eigenfrequenz des Bauwerks oder des Gerätes sein, um die resultierende maximale Verschiebung zu reduzieren. Bei kleinen Dämpfungsmassen, wie sie im Bauwesen üblich sind ($\xi < 100\%$), führt eine ungenaue Erfassung der Grundfrequenz in unmittelbarer Nähe der Resonanzstelle zu einer starken Beeinflussung der resultierenden dynamischen Verschiebungen.

Nachteilig bei der Tiefabstimmung wirkt sich aus, dass beim An- und Abstellen der Erregermaschine die Resonanzstellen durchfahren werden. Zudem kann aus betrieblichen Gründen bei Geräten und aus Stabilitätsgründen bei Gebäuden die Isolierung nicht beliebig weich ausgeführt werden, da bereits bei statischen Lasten zu grosse Verschiebungen auftreten können.

Hochabstimmung:

(vgl. Massnahme Nr.21, Aussteifung, Seite 134)

Wirksamkeit:

Bei schmalbandiger Anregung kann eine Isolierung gut ausgelegt und der Wirkungsgrad aufgrund der Übertragungsfunktion abgeschätzt werden (vgl. zum Beispiel Übertragungsfunktion des Einmassenschwingers, Fig. 6.24)

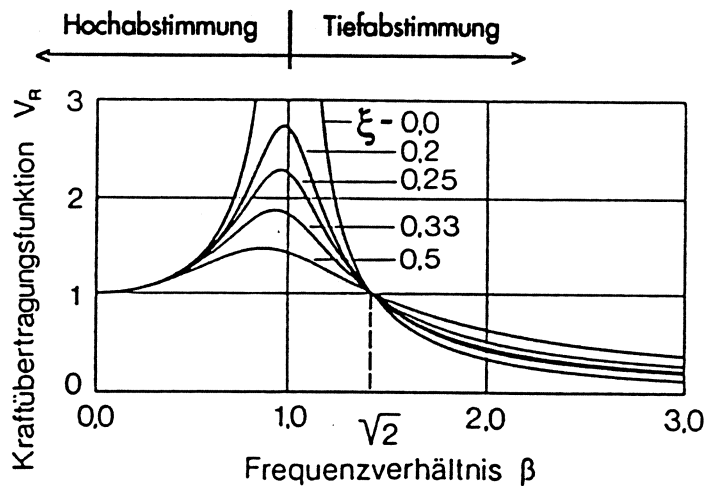


Fig. 6.24, Übertragungsfunktion des Einmassenschwingers

Bei der Gebäudisolierung können Schwingungsreduktionen im Frequenzbereich zwischen 10 und 20 Hz von 80% erreicht werden [3].

Dimensionierungsansätze

Bei der Dimensionierung wird folgendermassen vorgegangen:
Vorgaben:

- Gewicht der Maschine oder des Gebäudes inkl. Fundament
- Auflagerfläche
- Betriebs- bzw. Anregungsfrequenz f_1 der erzwungenen Schwingung

Vorgehen:

1. Bestimmung der statischen Flächenbelastung
2. Wahl des Federsystems
3. Bestimmung der Grundeigenfrequenz f_n (Abstimmungsfrequenz), welche durch die Elastizität der Feder und der schwingenden Masse bestimmt ist. Bei stossartigen Anregungen sind zur Vermeidung grosser dynamischer Verschiebungen Dämpferelemente vorzusehen
4. Bestimmung der Dämmwirkung: Das Verhältnis der Anregungsfrequenz f_1 zur ermittelten Grundfrequenz f_n bestimmt die Dämmwirkung. Diese kann durch den Dämmwert K [dB_v] bzw. den Isolierfaktor J [%] - entspricht dem Verhältnis der Erschütterungen mit und ohne Isolation - ausgedrückt werden.

Es wird unterschieden zwischen schmalbandiger und breitbandiger Anregung:

schmalbandige Anregung:

Darunter fallen überwiegend Maschinen mit rotierenden und oszillierenden Teilen. Diese können bezüglich ihrer Betriebsfrequenz in folgende drei Gruppen eingeteilt werden:

Gruppe 1:	niedrige bis mittlere Betriebsfrequenz $f_1 = 0.02$ bis 10 Hz Kolbenpumpen, Kolbenkompressoren, Webmaschinen etc.
Gruppe 2:	mittlere bis hohe Betriebsfrequenz $f_1 = 5$ bis 15 Hz grosse Dieselmotoren, Gebläse, gewisse Webmaschinen etc.
Gruppe 3:	hohe Betriebsfrequenzen $f_1 > 15$ bis 20 Hz kleinere Dieselmotoren, Zentrifugen, Vibratoren etc.

Tiefabstimmung im allgemeinen sinnvoll, wenn:

- (1) die Betriebs- bzw. Störfrequenz > 4 bis 6 Hz liegt,
- (2) höhere Eigenfrequenzen des Bauwerks, der Bauteile oder der Geräte nicht mit Frequenzen von massgebenden Harmonischen der dynamischen Last zusammenfallen,
- (3) die Verschiebungen die Stabilität des Gebäudes nicht gefährden, bei Geräten die Funktionsfähigkeit nicht eingeschränkt wird,
- (4) das Durchfahren der Grundfrequenz und höherer Eigenfrequenzen des Unterbaus beim An- und Abstellen der Maschine keine unzulässig starken Schwingungen verursachen.

Das Abstimmungsverhältnis Betriebsfrequenz/Grundfrequenz liegt vorzugsweise bei > 2 , meistens wird ein Verhältnis zwischen 2.5 bis 4 gewählt.

Tiefabstimmung wird vor allem bei Erreger der Gruppe 3 angewendet. Ist die Einfederung nicht genügend weich, können auch sogenannte Beruhigungsmassen, beispielsweise schwere Sockelkonstruktionen, die Grundfrequenzen reduzieren.

breitbandige Anregung:

Bei breitbandiger Anregung, beispielsweise infolge Strassen- und Schienenverkehr, werden Schwingungen oberhalb der Abstimmungsfrequenz deutlich reduziert. Insbesondere bei körperschalltechnisch relevanten Frequenzbereichen oberhalb 40 Hz ist die elastische Betätigung von Gebäuden eine wirksame Möglichkeit, die Körperschallübertragung zu unterbinden. Solche Massnahmen erfordern bei der Planung und während der Bauausführung grosse Sorgfalt; Schwingungsbrücken, beispielsweise durch ausgeflossenen Zement, können die Wirksamkeit massgebend verringern.

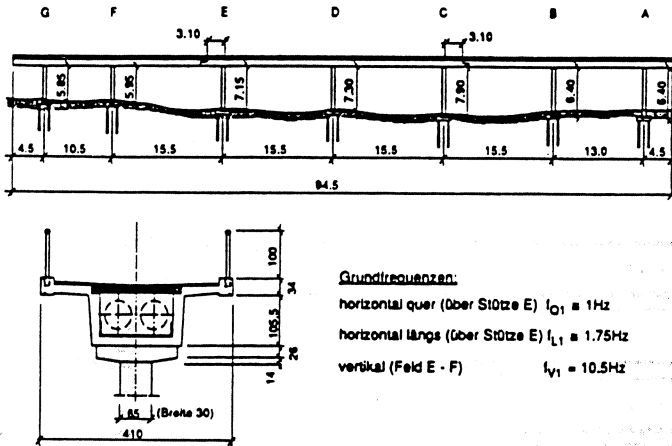
Beispiele:

In Nürnberg wurde im Jahre 1986 ein Wohngebäude flachgegründet mit einer durchgehenden Betonplatte unmittelbar über einer U-Bahn-Strecke errichtet. Um die aufgrund einer Messung auf dem Erdboden prognostizierten Erschütterungen abzuschirmen, wurde das gesamte Wohnhaus mittels Gummimatten (zellige Polyurethan Elastomere) flächenhaft isoliert.

Literatur:

- [1] Bachmann, H./Ammann, W.; 'Schwingungsprobleme bei Bauwerken'; Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau; Zürich 1987
- [2] Studer, J.; Ziegler, A.; 'Bodendynamik; Grundlagen, Kennziffern, Probleme'; Springer-Verlag, 1986
- [3] Winkler, A.; 'Schwingungs- und Körperschallschutz von Gebäuden'; Dokumentation D079, Vibrationen; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), Seite 151..154, 1991
- [4] Haupt, W.; 'Abschirmung eines tief gegründeten Gebäudes gegen Verkehrserschütterungen'; SIA D079 1991; Seite 43..47

21. Aussteifung



6.25, horizontal schwingende Fussgängerbrücke aus Stahlbeton

Art:	Ort:							
	bei der Quelle	im Übertragungs-m.	beim Empfänger					
organisat.								
betrieblich								
baulich								
Einsatz	vorsorglich		bei Eintritt					
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	
Wirkung	Frequenz		Stärke	Einwirk-dauer	Häufig-keit			
Wirksamkeit	gut		mittel		gering			
Kosten	hoch		mittel		niedrig			
Realisierung	sofort		mittelfristig		langfristig			

Beschreibung: Durch nachträgliche Aussteifung von Gebäuden oder einzelnen Bauteilen können die Übertragungsverhältnisse vor allem bei tieffrequenter Anregung günstig beeinflusst werden.

Die Möglichkeiten zur Aussteifung sind sehr zahlreich und müssen von Fall zu Fall den vorhandenen Gegebenheiten und Nutzungsanforderungen angepasst werden.

Gewöhnlich werden die Trägheitsmomente von Trägerquerschnitten durch bauliche Massnahmen erhöht oder die Spannweiten mittels Zusatzstützen und/oder -wänden verkleinert.

Wirkung: Diese Massnahme entspricht einer Hochabstimmung. Bei der Hochabstimmung wird versucht, das Gebäude, deren Bauteile oder das Gerät starr zu lagern, um die Grundeigenfrequenz über die Anregungsfrequenz zu verschieben. Im Gegensatz zur Tiefabstimmung können die Verschiebungen u nicht beliebig reduziert werden (Im Minimum $u_{dyn} = u_{stat}$, vgl. Fig. 2.5, Seite 8).

Wirksamkeit: Praktische Bedeutung haben solche Massnahmen bei tieffrequenter Anregung

Beispiele tieffrequenter Anregung:

- Maschinen kleiner Drehzahl (vgl. Seite 132, Gruppe 1)
- menscheninduzierte Schwingungsanregung (in Turnhallen, Konzert- und Tanzsälen, auf Fussgängerbrücken).

Bei verkehrsinduzierten Erschütterungen ist das Frequenzband sehr breit. Zudem ist bei Erschütterungsproblemen meistens der hochfrequente Körperschall massgebend. Eine Hochabstimmung von Bauwerken oder Bauteilen über diese Frequenzbereiche (>40 Hz) ist deshalb nicht sinnvoll.

Dimensionierungsansätze menscheninduzierte Schwingungen:

Bauwerksart	Bauweise			
	Stahlbeton	Spannbeton	Verbund Stahl - Beton	Stahl
Fussgängerbauwerke	1.6 bis 2.4 Hz und 3.5 bis 4.5 Hz vermeiden			
Bürogebäude	> 4.8 Hz ($\zeta > 5\%$) bzw. > 7.2 Hz ($\zeta < 5\%$)			
Turn- und Sporthallen	> 7.5 Hz	> 8.0 Hz	> 8.5 Hz	> 9.0 Hz
Tanzlokale und Konzertsäle ohne feste Bestuhlung	> 6.5 Hz	> 7.0 Hz	> 7.5 Hz	> 8.0 Hz
Konzertsäle und Theater mit fester Bestuhlung sowie Tribünen (mit Popkonzerten)	vertikal: > 6.5 Hz horizontal: > 2.5 Hz			

Tab. 6.6, erforderliche Mindest-Abstimmungsfrequenzen bei menscheninduzierter Schwingungsgefährdung.

Die Eigenfrequenzen von Tragsystemen lassen sich anhand der Bewegungs-Differentialgleichung für die freie Schwingung ermitteln. Die Lösung der Differentialgleichung führt zu einem Eigenwertproblem. Für verschiedene Tragsysteme (Balken, Rahmen, Bogen und Platten) bestehen Tabellenwerke mit den resultierenden Eigenwerten bzw. Eigenfrequenzen. Anhand vom Biegeschwungsverhalten eines unterschiedlich gelagerten Balkens kann der Einfluss der verschieden Grössen auf die Eigenkreisfrequenz veranschaulicht werde.

Die Eigenkreisfrequenz ω_n kann vergrössert werden durch:

- Vergrösserung des Trägheitsmomentes J
- Verkleinerung der Masse pro Längeneinheit μ
- Verkleinerung der Spannweite l
- Änderung der Auflagerbedingungen, Faktor α_m

$$\omega_n = \frac{\alpha_n^2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EJ}{\mu}}$$

Auflagerbedingungen	Faktor α_m
	$\alpha_1 = 4.73$ $\alpha_2 = 7.85$ $\alpha_3 = 11.00$ $\alpha_4 = 14.14$
	$\alpha_m = m \cdot \pi$ $m = 1, 2, \dots$
	$\alpha_1 = 4.73$ $\alpha_2 = 7.85$ $\alpha_3 = 11.00$ $\alpha_4 = 14.14$
	$\alpha_1 = 1.88$ $\alpha_2 = 4.69$ $\alpha_3 = 7.85$ $\alpha_4 = 11.00$
	$\alpha_1 = 3.93$ $\alpha_2 = 7.07$ $\alpha_3 = 10.21$ $\alpha_4 = 13.35$

Fig. 6.26, Eigenfrequenzen für Träger

Beispiele:

Eine Fussgängerbrücke aus Stahlbeton ist als Durchlaufträger über sechs Felder mit einer Regelspannweite von 15.5 m ausgebildet (Fig.6.24, [2]). Durch Gehen einer grossen Anzahl Personen wurde die Brücke in horizontaler Richtung zu starken Schwingungen angeregt. Beim Gehen werden dynamische Kräfte horizontal quer zur Gehrichtung vor allem in der halben Schrittfrequenz abgegeben. Die horizontale Grundfrequenz der Brücke über den Stützen von ≈ 1 Hz entsprach im vorliegenden Beispiel gerade der halben Schrittfrequenz ≈ 2 Hz, so dass Resonanzeffekte eintraten. Als Massnahme wurde die horizontale Grundfrequenz auf ≥ 3.4 Hz angehoben. Diese Vorgabe wurde durch Verstärkung der Fundamentplatte und durch Vergrösserung des Stützenquerschnitts - Ummantelung mit stark bewehrtem Beton und gutem Verbund - erreicht.

Literatur:

- [1] Bachmann, H./Ammann, W.; 'Schwingungsprobleme bei Bauwerken'; Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau; Zürich 1987
- [2] Bachmann, H.; 'Schwingungssanierung von Turnhallen, Gesellschaftssälen, Fussgängerbrücken und Sprungtürmen'; Dokumentation D079 Vibrationen; Schweizer Ingenieur und Architekt (SIA), Seite 151..154, 1991

22. Schwingungs- und Stosstilger

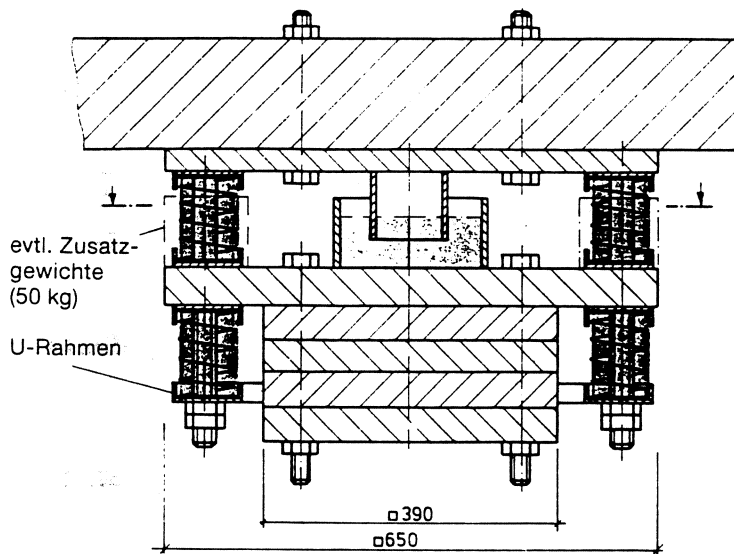


Fig. 6.27, Deckentilger

Art:	Ort:		
	bei der Quelle	im Übertragungsm.	beim Empfänger
organisat.			
betrieblich			
baulich			

Einsatz	vorsorglich				bei Eintritt			
Quellentyp	1	2	3	4	5	6	7	8
Empfänger	Bauwerke			Geräte			Mensch	

Wirkung	frequenz	Stärke	Einwirkdauer	Häufigkeit
	gut		mittel	gering

Wirksamkeit	hoch	mittel	niedrig
Kosten	sofort	mittelfristig	langfristig
Realisierung	sofort	mittelfristig	langfristig

Beschreibung: Ein Schwingungstilger ist ein auf ein schwingendes Hauptsystem (Gerät, Bauwerk oder Bauteil) abgestimmtes schwingungsfähiges System, bestehend aus einer meistens verstellbaren Masse und Feder-Dämpfer-Elementen.

Ein Stosstilger ist ein nichtlinearer Tilger, welcher so an das Hauptsystem befestigt wird, dass dessen Masse in jeder Periode ein bis zweimal am Hauptsystem anschlägt.

Tilger kommen vor allem bei grossen, freistehenden Bauwerken (Brücken, Schornsteinen, grosse Treppen, Stadiondächer) und Fussgängerbrücken zum Einsatz. Sie können auch nachträglich eingebaut werden.

Wirkung: Die im Schwingungstilger induzierten Kräfte wirken der Schwingung des Hauptsystem entgegen. Während die Verschiebungen am Hauptsystem stark reduziert werden, müssen beim Schwingungstilger im allgemeinen beträchtliche Verschiebungen in Kauf genommen werden.

Wirksamkeit: Die Amplitude kann nur in unmittelbarer Nähe der Resonanzstelle abgemindert werden. Die Tilgerfrequenz muss genau auf das Hauptsystem abgestimmt werden. Tilger sind vor allem bei geringen Dämpfungsmassen ξ und niedrigen Eigenfrequenzen des Hauptsystems wirksam.

Schwingungstilger sind nicht geeignet bei Bauwerken und Bauteilen:

- grosser Masse
- grosser Dämpfungsmasse ξ
- mit mehreren nahe beieinanderliegenden Eigenfrequenzen f_n

Dimensionierungsansätze Für eine genaue Dimensionierung muss unbedingt die Fachliteratur beigezogen werden. An dieser Stelle können nur einige Ansätze gegeben werden:

- Die Tilgerfrequenz ist abhängig vom Verhältnis der Masse des Hauptsystem zur Masse des Tilgers und liegt in der Grössenordnung von ~95% der Eigenfrequenz des Hauptsystems.

$$f_T = \frac{f_H}{1 + \frac{m_T}{m_H}}$$

- Optimales Dämpfungsmass

$$\xi_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3 \times \left(\frac{m_T}{m_H}\right)}{8 + 8 \times \left(\frac{m_T}{m_H}\right)^3}}$$

- Masse des Schwingungstilgers muss ungefähr 1/20 der Masse des Hauptsystems entsprechen.

Beispiele:

- Fussgängerbrücke Zürich, Tilgermasse 2 x 200 kg, Frequenz 2,4 Hz, Vertikal Tilger (Fig. 6.28)
- Deckentilger (Fig. 6.27)
- Pylontilger bei Schrägseilbrücke in Bangkok

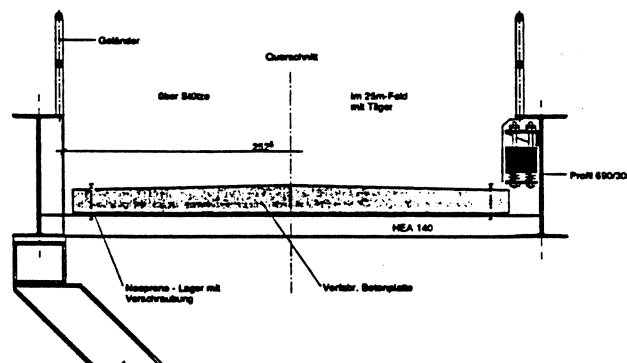


Fig. 6.28, Fussgängerbrücke mit Vertikaltilger

Literatur:

- [1] Bachmann, H./Ammann, W.; 'Schwingungsprobleme bei Bauwerken'; Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau; Zürich 1987

23. Fundationsausbildung

Art:	Ort:									
organisat.		bei der Quelle		im Übertragungs-m.				beim Empfänger		
betrieblich										
baulich										
Einsatz		vorsorglich				bei Eintritt				
Quellentyp		1	2	3	4	5	6	7	8	
Empfänger		Bauwerke			Geräte			Mensch		
Wirkung		Frequenz		Stärke		Einwirk-dauer		Häufig-keit		
Wirksamkeit		gut			mittel			gering		
Kosten		hoch			mittel			niedrig		
Realisierung		sofort			mittelfristig			langfristig		

Beschreibung: Bei der Projektierung von Gebäuden in erschütterungs- und körperschallgefährdeter Umgebung können die Auswirkungen von Vibrationen durch geeignete Fundierung minimiert werden.

Tendenzen:

1. Schwingungsbrücken sollten bei der Fundierung von körperschallgefährdeten Bauwerken möglichst vermieden werden. (Fels, Tunneldecke, Fahrbahnplatte, Grundwasser ...)
2. Bei Pfahlfundationen sind im Vergleich zu Flachfundationen kleinere Schwingstärken zu messen, sofern keine Schwingungsbrücken hergestellt werden [1].
3. Steife Flachfundamente mit grosser Aufstands- bzw. Sohlfläche vermindern die Schwingstärken $\Rightarrow$ Massnahme: Fundamentfläche erhöhen
4. Mit zunehmender Gebäude- und Fundamentmasse nimmt die Resonanzfrequenz bei der Koppelung Boden-Bauwerk ab [2],[3] $\Rightarrow$ Massnahme: Gebäude- und Fundamentmasse erhöhen um die höheren Frequenzanteile abzumindern (Körperschall)
5. Der Einfluss der Steifzahl bzw. des Steifigkeitsverhältnisses zwischen dem Fundament und dem Boden kann folgendermassen umschrieben werden: Mit zunehmender Steifzahl nimmt die Resonanzfrequenz und die Dämpfung zu [2].
 $\Rightarrow$ Massnahme: Die Steifigkeit des Fundamentes kann bspw. durch Vorspannung den Erfordernissen angepasst werden.

Wirkung: Die Fundierung beeinflusst in erster Linie die Koppelungseigenschaften zwischen Boden und Bauwerk (vgl. Koppelung Boden-Bauwerk, Seite 34). In der Regel werden Schwingungen bei der Übertragung abgemindert, Probleme treten vor allem bei Resonanzen auf. Die vorgängig genannten Massnahmen verändern vor allem die Eigenfrequenzen und somit die Resonanzfrequenzen.

Wirksamkeit: Am wirksamsten ist die Vermeidung von Schwingungsbrücken insbesondere bei Körperschallgefahr. Erreicht man durch entsprechende Fundationsgestaltung eine Abminderung der Resonanzfrequenzen werden analog einer Tiefabstimmung besonders die körperschalltechnisch relevanten höheren Frequenzanteile abgemindert.

- Literatur:**
- [1] Haupt, W.; 'Abschirmung eines tief gegründeten Gebäudes gegen Verkehrserschütterungen'; Dokumentation D079 Vibrationen; Schweizer Ingenieur und Architekt (SIA), Seite 43..47, 1991
 - [2] Studer, J.; Ziegler, A.; 'Bodendynamik; Grundlagen, Kennziffern, Probleme'; Springer-Verlag, 1986
 - [3] Richart, F.E., Woods, R.D., Hall, J.R.; 'Vibrations of Soils and Foundations'; Prentice-Hall, Inc.; New Jersey 1970

7. Literaturverzeichnis

Die Literaturstellen, welche im Massnahmenkatalog angegeben werden (Seite 80 bis 140) sind pro Massnahme jeweils am Schluss verzeichnet. Aus diesem Grund werden diese hier nicht mehr aufgeführt.

- [1] Schweizerischer Architekten und Ingenieurverein SIA, Dokumentation D 079; 'Vibrationen: Ursachen, Messung, Analyse und Massnahmen', 1991
- [2] Studer, J; Ziegler, A; 'Bodendynamik: Grundlagen, Kennziffern, Probleme', Springer-Verlag, Berlin, 1986
- [3] Auersch, L; 'Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental', Forschungsbericht 155, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin.
- [4] Bachmann, H; Ammann, W; 'Schwingungsprobleme bei Bauwerken: Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen', Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau IVBH, Zürich, 1987
- [5] SUVA; 'Gehörgefährdender Lärm am Arbeitsplatz', Schweizerische Blätter für Arbeitssicherheit SBA Nr. 146, 1988