Erschütterungen

Mit der zunehmenden Überbauung in den städtischen Agglomerationen der Industriestaaten gewinnen Probleme des Immissionsschutzes immer größere Bedeutung. Die Voraussage von Erschütterungsintensitäten infolge Bautätigkeit, Industrieproduktion und Verkehr, die Beurteilung dieser Auswirkungen und die Realisierung etwaiger Gegenmaßnahmen gehören zu den ältesten Aufgabenstellungen der Bodendynamik. Untersuchungen über Erschütterungen infolge Sprengungen oder Betrieb von Maschinen treten bei vielen Bauaufgaben auf. Früher ging es vor allem um die Beurteilung von Erschütterungen bezüglich der Gefährdung von Bauwerken. Seit einiger Zeit hat das Problem der Belästigung von Bewohnern durch Erschütterungen (spürbare Erschütterungen und abgestrahlter Körperschall) immer mehr an Bedeutung gewonnen.

Das Vorgehen zur Behandlung von Erschütterungen und Körperschallproblemen bei der Planung oder beim Bau und Betrieb von Verkehrs- oder Industrieanlagen zeigt schematisch Bild 5.1.

5.1 Ausbreitung von Erschütterungen

Erschütterungen breiten sich im Boden in Form von Wellen aus (vgl. Kap. 3). Sie werden an geologischen Schichtgrenzen und teilweise am Grundwasserspiegel reflektiert und refraktiert. Die Berechnung der Erschütterungsausbreitung ist deshalb sehr komplex. Zur Untersuchung von Erschütterungsproblemen hat sich die in Bild 5.2 dargestellte grundsätzliche Modellvorstellung bewährt.

Es werden drei Bereiche unterschieden: Quelle, Übertragungsmedium und Empfänger. Je nach Problemstellung sieht das Modell für den interessierenden Bereich etwas anders aus. Grundsätzlich könnte die Erschütterungsausbreitung mittels der Elastizitätstheorie, z. B. mit Hilfe eines Finite-Element-Programmes, untersucht werden (Bild 5.3). Modellrechnungen haben gezeigt, dass damit gute Voraussagen gemacht werden können (z. B. Rücker und Said, 1994, Hochgatterer 1996). Dazu müssten aber die Materialeigenschaften und die Geometrie jeder Bodenschicht im Detail bekannt sein. Gleichzeitig wären genaue Kenntnisse der Energieübertragung beim Empfänger notwendig; tatsächlich ist oft das Eigenschwingverhalten am Ort des Empfängers der

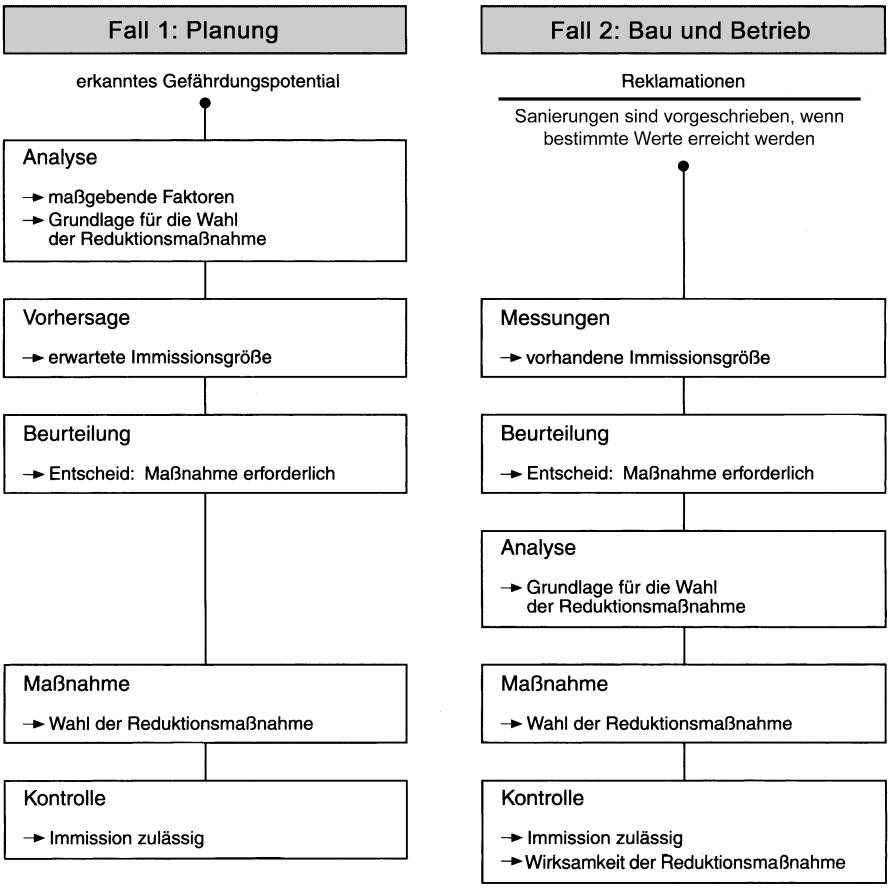

Bild 5.1. Vorgehensweise bei der Behandlung von Erschütterungen und Körperschallproblemen

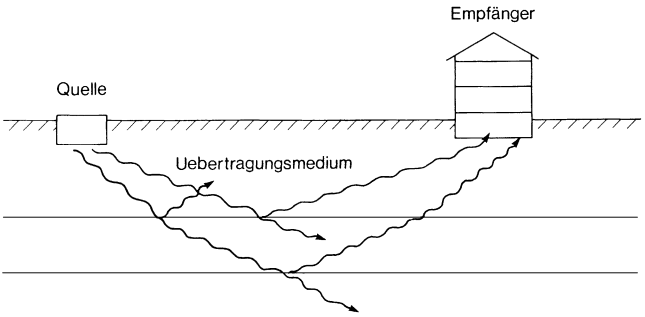

Bild 5.2. Grundsätzliche Modellvorstellung

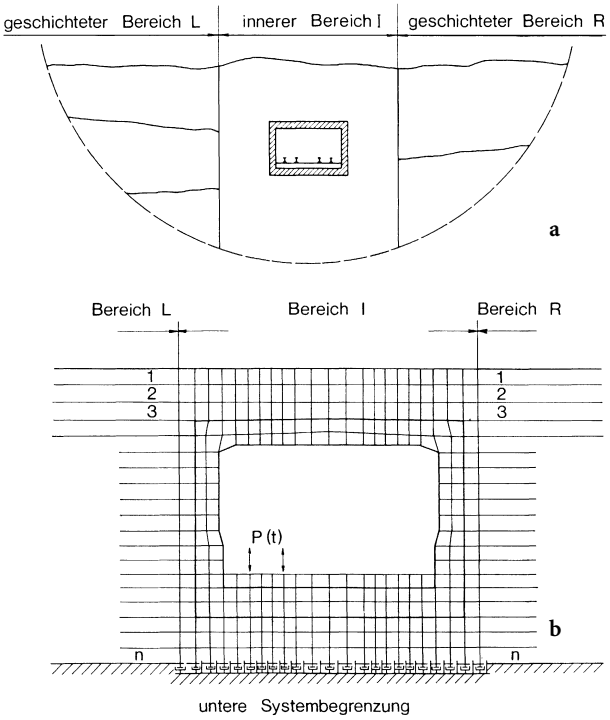

Bild 5.3. FE-Berechnung (nach Rücker, 1978)

wichtigste von allen Parametern. Die benötigten Kenndaten fehlen im Allgemeinen und sind meistens nur mit einem größeren Kostenaufwand zu erhalten. Aus diesen Gründen haben sich Ausbreitungsberechnungen mit Finite-Elementprogrammen in der Praxis nur bedingt durchgesetzt. Sie bleiben Grundlagenuntersuchungen vorbehalten.

Üblicherweise begnügt man sich mit einer phänomenologischen Betrachtungsweise, die zu semi-empirischen Formeln und Gesetzmäßigkeiten führt. Entsprechende Ansätze beruhen auf theoretischen Grundlagen, die mittels experimenteller Daten kalibriert werden.

5.1.1 Erschütterungsausbreitung bei Verkehrsträgern

Am Beispiel der Erschütterungsausbreitungsuntersuchung an einer unterirdischen Bahnanlage wird ein mögliches Vorgehen dargestellt. Die Problemstellung kann gemäß Bild 5.4 modelliert werden. Die Aussagegenauigkeit einer solchen Lösung ist allerdings von der Güte der verwendeten empirischen Eingabe- und Abminderungsbeziehungen abhängig. Die hier dargestellten Beziehungen sind erste Annäherungen.

Verschiedene Autoren – namentlich solche aus dem Forschungsgebiet der Akustik – stellen Erschütterungen in der Form von Dezibel (dB) dar. Dezibel

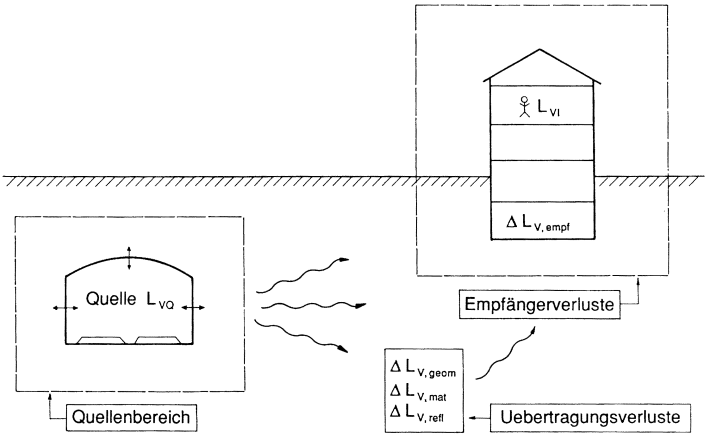

Bild 5.4. Ausbreitung der Erschütterungen bei einem Tunnel

ist eine logarithmische Darstellung der interessierenden Größe. Als solche wird meistens die Partikelschwinggeschwindigkeit, seltener die Partikelbeschleunigung gewählt. Die Definition lautet:

$$dB(v) = 20 \log (v/v_{ref}), \tag{5.1}$$

wobei

v = Partikelgeschwindigkeit (mm/s),
v_{ref} = Referenzwert, früher meist: $5 \cdot 10^{-5}$ mm/s,
heute meist (ISO 1683 (1983)): 10^{-6} mm/s.

Bei der Darstellung der Erschütterungen in Dezibel lassen sich multiplikative Amplitudenveränderungen durch Zu- und Abschläge angeben. Damit lässt sich die Modellvorstellung von Bild 5.4 wie folgt darstellen:

$$L_{VI} = L_{VQ} \underbrace{- \Delta L_{V,geom} - \Delta L_{V,mat} - \Delta L_{V,refl}}_{\text{Verluste im Übertragungsmedium}} \underbrace{- \Delta L_{V,koppl} - \Delta L_{V,empf}}_{\text{Verluste bzw. Verstärkungen beim Empfänger}}, \tag{5.2}$$

wobei

L_{VI} = Erschütterung am Immissionsort (Empfänger),
L_{VQ} = Erschütterung an der Quelle,
$\Delta L_{V,geom}$ = Amplitudenreduktion infolge geometrischer Dämpfung,
$\Delta L_{V,mat}$ = Amplitudenreduktion infolge Materialdämpfung,
$\Delta L_{V,refl}$ = Amplitudenreduktion durch Reflexionen auf dem Übertragungsweg,
$\Delta L_{V,koppl}$ = Amplitudenreduktion infolge Kopplungsverlusten beim Übergang vom Boden zum Fundament,
$\Delta L_{V,empf}$ = Amplitudenveränderung beim Empfänger.

Die Gleichung (5.2) ist auf verschiedene Schwingungskomponenten und Frequenzbereiche getrennt anzuwenden, wobei theoretisch Kompressions-, Scher- und Rayleighwellen einzeln zu betrachten wären, was in der Praxis selten durchgeführt wird. Es ist darauf zu achten, dass einerseits die wesentlichen Einflussgrößen erfasst sind, andererseits die Daten miteinander kompatibel sind. Die verschiedenen Anteile in (5.2) werden im Folgenden diskutiert.

Quellenbereich

Die Einleitung der Energie an der Quelle hängt einerseits von der Quelle selbst, andererseits vom unmittelbar angrenzenden Übertragungsmedium ab. Diese Faktoren bestimmen, wie viel von der bei der Quelle vorhandenen Energie überhaupt ins Übertragungsmedium abgegeben wird, wie viel der mechanischen Energie im Nahbereich durch Materialdämpfung verloren geht und wie die abgestrahlte Energie sich auf einzelne Wellenarten verteilt. Das heißt: auch die Quellenwerte sind von der unmittelbaren Umgebung abhängig.

Oberflächennahe Quellen erzeugen überwiegend Oberflächenwellen, unterirdische, tiefliegende Quellen vorherrschend Raumwellen. Welche Energie von der Quelle abgestrahlt wird, kann oft nur aufgrund von vereinfachenden Annahmen abgeschätzt werden. Einfacher und genauer ist es deshalb, wenn möglich die Erschütterung an der Quelle direkt zu messen, beim Beispiel der Tunnelanlage durch Messen der Erschütterungen L_{VQ} an der Tunnelwand. In der Literatur lassen sich zahlreiche Messungen dieser Art finden (z. B. Bild 5.6). In welchem Maß ein Tunnelprofil Erschütterungen in die Umgebung abstrahlt, zeigt Bild 5.5 deutlich. Dargestellt ist die jeweilige Admittanz für

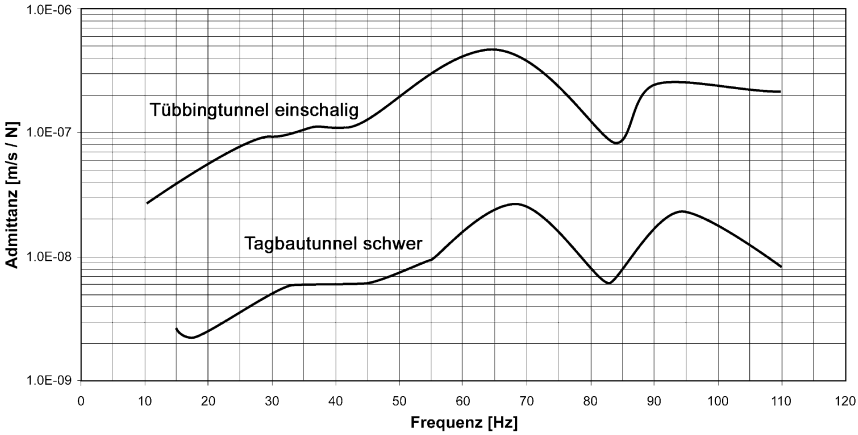

Bild 5.5. Beispiel der Bereiche der Eingangsadmittanz zweier typischer Tunnelquerschnitte (Rutishauser 2004)

einen einschaligen Tübbingtunnel und einen schweren Tagbautunnel; beide Bauwerke liegen in identischen Baugrundverhältnissen. Die Admittanz M(f) ist der Kehrwert der Impedanz in [(m/s)/N]. Sie stellt das Verhältnis der angeregten Schwinggeschwindigkeit v(f) zur anregenden Kraft dar. Sie ist ein Maß für die Schwingungsempfindlichkeit („Schwingungsfreudigkeit") eines mechanischen Systems (z. B. Oberbau, Tunnel, Gebäude). Es wird unterschieden zwischen Eingangsadmittanz (Admittanz an der Einleitungsstelle der Kraft) und der Übertragungsadmittanz (Admittanz zwischen zwei auseinanderliegenden Punkten). Es ist deutlich erkennbar, dass das schwere Tunnelprofil weniger schwingungsempfindlich ist.

Bild 5.6 zeigt Erschütterungen, wie sie infolge eines Bahnbetriebes an der Tunnelwand gemessen worden sind. Dargestellt sind Resultate von Messungen bei U-Bahnen mit relativ geringen Achslasten (Bild 5.6 a) und Resultate von Vollbahnen (Bild 5.6b). Die beiden Diagramme weichen vor allem im tiefen Frequenzbereich voneinander ab. Dies soll zeigen, dass lokale Messungen bei konkreten Fragestellungen mit weitreichenden Konsequenzen fast unumgänglich sind.

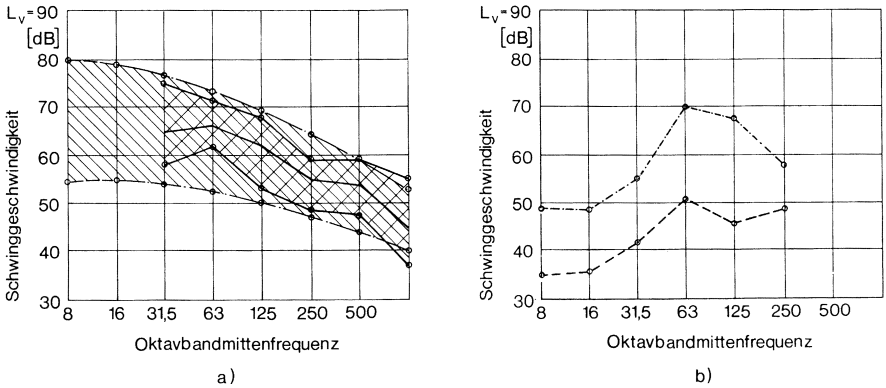

Bild 5.6. Schwinggeschwindigkeitsspektren an der Tunnelwand als Eingabegröße für (5.2) mit $v_{ref} = 5 \cdot 10^{-5}$ mm/s

a U- und S-Bahn:

Bereich der Tunnelwandschwingungen nach Manning (1974). Bedingungen: Betontunnel bestehend aus 2 Rechteckquerschnitten in Lockerböden, 1,5 bis 7,5 m unter Erdoberfläche; Schotteroberbau oder direkte Schienenauflage; durchgehend geschweißte Schienen; v = 65 km/h.

Mittelwert aus 15 Spektren und Bereich, der 90 % der Meßwerte umfaßt (nach Kurzweil, 1978). Bedingungen: Betontunnel, zweigleisiger Rechteckquerschnitt, Lockergestein, durchgehend verschweißte Schienen, Schotteroberbau, v = 60 km/h.

b Vollbahn (Messungen Studer):

–·–·– obere Bandgrenze (= Messwert, der von weniger als 15 % aller Messungen überschritten wird).

– – – untere Bandgrenze (= Messwert, der von weniger als 15 % aller Messungen unterschritten wird). Bedingungen: Betontunnel, zweigleisig, Lockergestein. Direkte Schienenauflage (kein Masse-Feder-System). v = 40 bis 80 km/h.

Verluste im Übertragungsmedium

Übertragungsverluste treten in verschiedensten Formen auf. Sie bewirken im Allgemeinen eine Abnahme der Amplituden mit der Entfernung von der Quelle. Sind aber Schichten vorhanden, welche die Erschütterungen besonders gut leiten, können bei entfernteren Empfängern trotzdem größere Erschütterungen auftreten als näher bei der Quelle. Zur Bestimmung der Verluste im Übertragungsmedium sind deshalb möglichst gute Kenntnisse der Geologie notwendig. Es ist zu empfehlen, die berechneten Verluste durch Messungen zu bestätigen.

Allein aufgrund der Energieverteilung im Halbraum auf den mit der Entfernung von der Quelle wachsenden Flächen der Wellenfronten ergibt sich die sogenannte **geometrische Dämpfung**. Sie ist abhängig von der Entfernung, der Wellenart und der Art der Quelle. Die Amplitude in der Entfernung r von der Quelle ist bei der Punktquelle proportional zu:

r^{-1} für Raumwellen in der Tiefe,
r^{-2} für Raumwellen an der Oberfläche des Halbraumes,
$r^{-1/2}$ für Rayleighwellen,

und bei der Linienquelle proportional zu:

$r^{-1/2}$ für Raumwellen in der Tiefe,
r^{-1} für Raumwellen an der Oberfläche des Halbraumes,
r^{0} für Rayleighwellen, d. h. unabhängig von r.

Die **Materialdämpfung** ist eine echte Dämpfung. Da die Dehnungsamplituden bei Erschütterungen sehr klein sind, wird der Einfluss der Materialdämpfung meist überbewertet. Der Einfluss ist in der Nähe der Quelle am größten, wo die Dehnungsamplituden am größten sind. Hinweise auf Materialdämpfungswerte finden sich in Kapitel 4.

Amplitudenverluste infolge Reflexionen und Refraktionen sind schwierig zu erkennen und abzuschätzen. Sie werden deshalb praktisch nie berücksichtigt. Werden Kalibriermessungen durchgeführt, sind sie in den Ergebnissen bereits enthalten.

Anhaltswerte für den Bereich der Verluste im Übertragungsmedium zeigt Bild 5.7. Deutlich ist die Abhängigkeit von der Frequenz der Erschütterung und der Entfernung von der Quelle zu erkennen. Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass die geologisch/geotechnischen Gegebenheiten für den Verlauf der Pegelabnahme maßgebend sind.

Verluste beim Übergang Übertragungsmedium/Empfänger
Im Allgemeinen wird bei der Erschütterungsübertragung vom Boden auf das Bauwerk mit einer deutlichen Abnahme der Erschütterungsintensität gerechnet. Die Masse des Gebäudes, namentlich im Fundationsbereich,

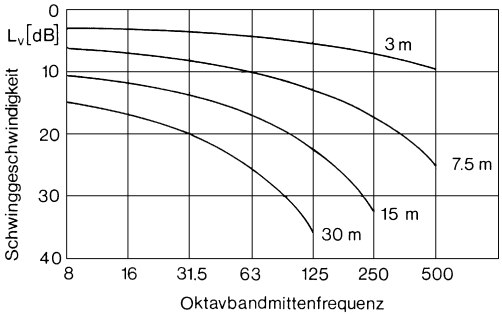

Bild 5.7. Pegelabnahme der Schwinggeschwindigkeit bei „durchschnittlichen" Lockerböden in verschiedenen Abständen von der Tunnelwand (nach STUVA 14/81)

spielt eine große Rolle. Schwere Gebäude werden weniger stark angeregt. Die Übertragung der Erschütterungen ist stark frequenzabhängig. Bei tiefen Frequenzen sind die Verluste sehr klein, z. T. sind sogar Verstärkungen möglich. Bei höheren Frequenzen sind Amplitudenreduktionen von 20 bis 40% beobachtet worden.

Einen Hinweis, mit welchen Verlusten zu rechnen ist, gibt Tabelle 5.1.

Bild 5.8 zeigt gemessene Übertragungsspektren vom Boden auf das Fundament bei Eisenbahnerschütterungen. Die Messungen umfassen total 82 Gebäude (20 leichte Bauten ohne Untergeschoss, 42 leichte Bauten mit 1–2 Untergeschossen, 15 schwere Bauten mit 1–2 Untergeschossen und 5 schwere Bauten

Tabelle 5.1. Bereich von Übertragungsverlusten Boden-Bauwerk. Die Verluste sind auch vom Bauwerk abhängig.

Frequenz (Hz)	Übertragungsverluste
<1	Keine
1 – 10	1 – 10%
10 – 40	10 – 40 %

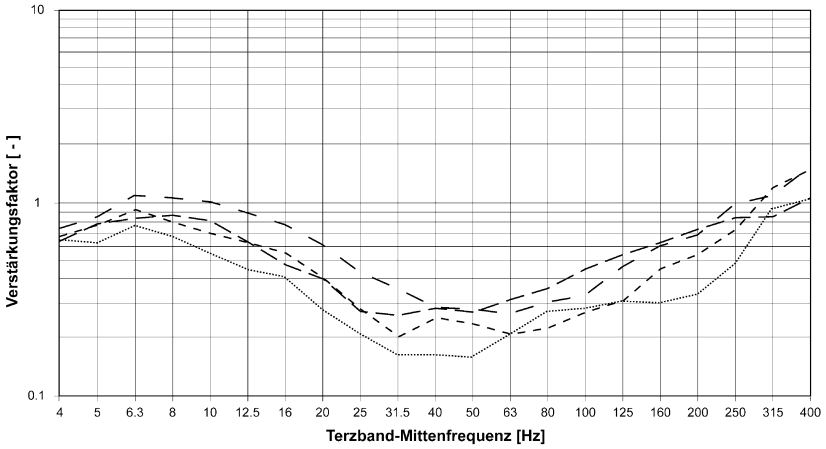

Bild 5.8. Gemittelte Übertragungsspektren vom Boden auf das Fundament von total 82 Bauten; die leichten Gebäude liegen weitgehend im oberen Teil des Bereichs, die schweren im unteren Teil. (Rutishauser, 2004)

mit 1–2 Untergeschossen und einem vorgelagerten Gehsteig). Die Abminderung bei den leichten Bauten liegt im oberen Teil des Bereichs, diejenigen der schweren im unteren Teil, d.h. dass bei diesen die Erschütterungen stärker abgemindert werden.

Verstärkung bzw. Abschwächung beim Empfänger

Die Antwort eines Gebäudes auf die vom Untergrund einfallenden Erschütterungen ist von den Eigenfrequenzen des Gebäudes und seiner Bauteile sowie vom Frequenzgehalt der einfallenden Erschütterungen abhängig. Die einzelnen Frequenzen werden unterschiedlich angeregt. Die Übertragungsfunktion eines Gebäudes auf eine einfallende Erschütterung kann gemäß Bild 2.10 angenähert werden. Für die einzelnen Bauelemente sind deren Eigenfrequenzen maßgebend. Dies zeigt Bild 5.9 eindrücklich. Hier sind aus vielen Messungen Decken mit Eigenfrequenzen um 20 Hz ausgewählt worden.

Innerhalb des Gebäudes hängt die Erschütterungsübertragung stark vom Gebäude selbst ab. Bei Gebäuden aus massivem Mauerwerk nehmen die Erschütterungen mit zunehmender Höhe über Boden meist ab. Bei modernen Stahlskelettbauten sind große Erschütterungsanfachungen in den oberen Stockwerken möglich. Anhaltswerte für die Verluste beim Empfänger sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt.

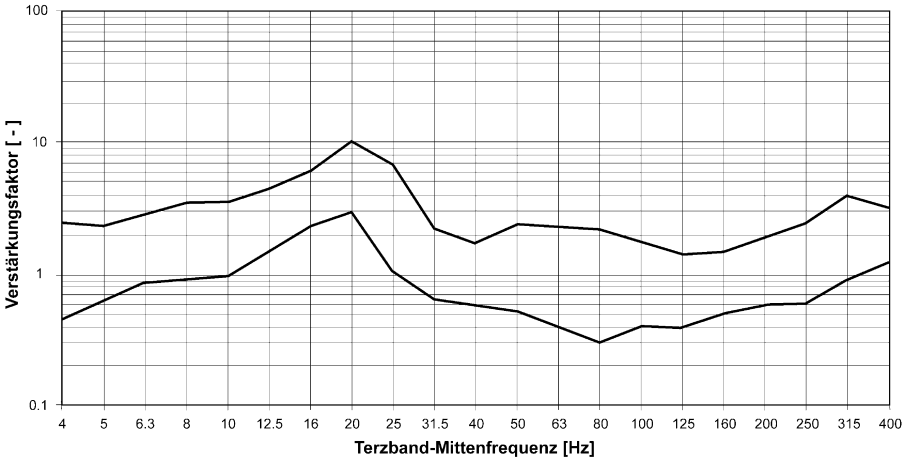

Bild 5.9. Übertragungsspektren vom Boden auf die-Geschossdecken. Klar erkennbar ist, dass im Bereich der Eigenfrequenz der Decken (20Hz) die Spektralamplituden stark angehoben sind (Resonanzeffekte). (Rutishauser, 2004)

Tabelle 5.2. Anhaltswerte für Amplitudenreduktion im Bereich des Empfängers

Gebäude	$\Delta L_{V,koppl}$ (dB)	$\Delta L_{V,empf}$ (dB) (typische Gebäude mit 2 bis 4 Stockwerken)
leichte Mauerwerksgebäude mit Holzbalkendecke	0 bis 10	–15 bis –20 (Verstärkung)
Wohnbauten mit Betondecken	0 bis 10	–12 bis –17 (Verstärkung)
neue Stahlskelettbauten in Leichtbauweise mit Plattengründung	0 bis 10	–5 bis –15 (– 20) (Verstärkung)
schwere Mauerwerksgebäude mit Tiefengründung	15 ± 5	–
Gebäude in unmittelbarer Nähe zum Tunnel bzw. baulich damit verbunden	0	–

Bemerkungen

- Die Streuungen sind von Bauwerk zu Bauwerk sehr groß. Die Amplifikationen sind für aufgehendes Mauerwerk und Decken verschieden.
- Innerhalb eines Bauwerkes können die Verhältnisse je nach Spannweite und Bauart einzelner Decken sehr unterschiedlich sein.

5.1.2 Ausbreitung von Spreng- und Rammerschütterungen

Im Gegensatz zu den vorgängig behandelten Erschütterungsquellen infolge Verkehr sind solche infolge Sprengungen oder Rammarbeiten weitgehend Punktquellen. Dazu kommt, dass durch diese Bauarbeiten an der Quelle durch die große Zerstörungs- und Deformationsarbeit viel mechanische Energie abgebaut wird. Die Messung der Erschütterungsintensität im Quellengebiet ist deshalb nicht sinnvoll. Man verwendet deshalb üblicherweise die bei der Quelle eingebrachte Energie als Kenngröße und benutzt Vorversuche zum Kalibrieren der Übertragungsgesetze. Bei Sprengerschütterungen hat sich die folgende Darstellung bewährt:

$$v = c W^{\alpha} r^{\beta}, \tag{5.3}$$

wobei

v = Partikelschwinggeschwindigkeit (mm/s),
c = Koeffizient für Sprengstofftyp und Energiekopplung (empirisch), ist experimentell zu bestimmen,
r = Distanz Empfänger – Quelle (m),
W = Sprengstoffgewicht (kg),
α = Skalierungsfaktor $1/3 < \alpha < 1/2$, meist $\alpha = 1/3$,
β = Skalierungsfaktor $-2 < \beta < -1$, (Punktquelle -2), ist experimentell zu bestimmen.

Bild 5.10a zeigt, dass diese Formel in Kombination mit Kalibrierversuchen gute Resultate liefert. Betrachtet man jedoch Bild 5.10b, in dem die Resultate verschiedener Messstationen dargestellt sind, zeigt sich eine wesentlich größere Streuung. Dieses Beispiel unterstreicht, dass bei der Übertragung von Messresultaten größte Vorsicht geboten und immer mit größeren Abweichungen zu rechnen ist. Ähnliche Ansätze und Aussagen sind auch bezüglich Rammerschütterungen zu machen. Werden höhere Anforderungen an die Berechnung der Erschütterungsausbreitung gestellt, sind Messungen unumgänglich.

Bei Rammerschütterungen ist ein analoger Ansatz wie bei Sprengerschütterung mit Gleichung (5.3) üblich, wobei das Sprengstoffgewicht durch einen Kennwert für den Maschinentyp ersetzt ist. Umfassende Hinweise über Erschütterungsausbreitung bei Bauarbeiten gibt der TRL Report 429 (2000).

5.1.3
Ausbreitung von Erschütterungen infolge Maschinen in Industrieanlagen

Einzelstehende Maschinen von Industrieanlagen können als Punktquelle mit dem gleichen Ansatz (5.3) behandelt werden.

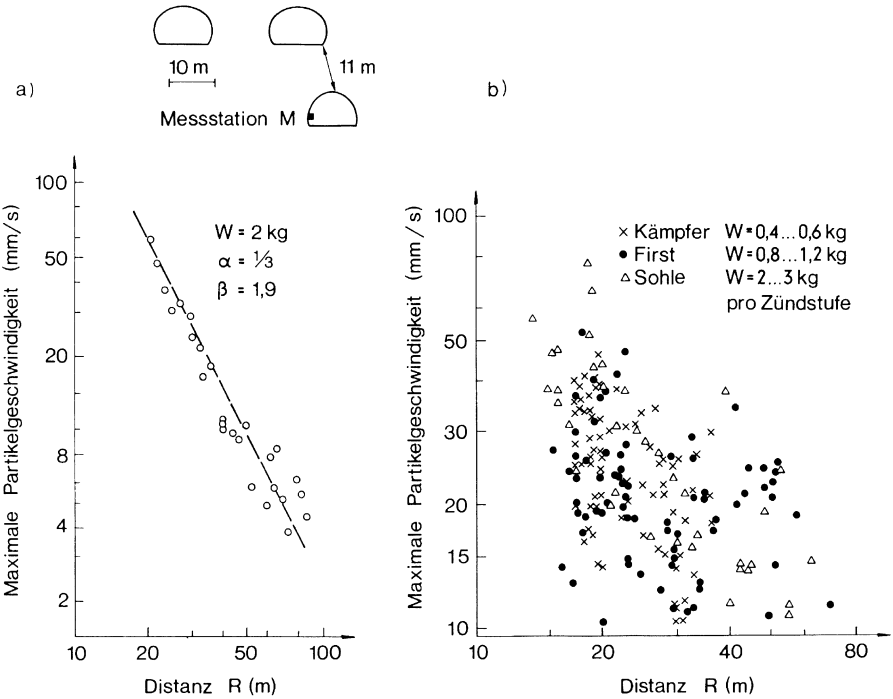

Bild 5.10. Sprengerschütterungen (nach Studer und Süsstrunk, 1981); **a** Resultate einer einzelnen Messstation M; Fels: Gneis, Ausbruch des Profils; **b** Daten von verschiedenen Messstationen in verschiedenen Tunnelquerschnitten

5.2 Beurteilung der Erschütterungen

Zur Beurteilung von Erschütterungen sind verschiedene Kriterien maßgebend. Der Ingenieur muss sich je nach Situation entscheiden, ob er ein Gebäude vor Beschädigung, die Bewohner vor Belästigung zu schützen hat oder das einwandfreie Funktionieren von installierten Geräten und Einrichtungen zu gewährleisten ist. Je nachdem was konkret als maßgebend definiert wird – bei Bauten und Maschinen Schäden oder Gebrauchstauglichkeit, bei Menschen Belästigung –, wird er andere Beurteilungskriterien anwenden müssen. Bild 5.11 zeigt deutlich, dass der Mensch bereits solche Erschütterungen spürt (und sich von ihnen belästigt fühlt), welche noch keine Schäden an Bauten hervorrufen. Aus wirtschaftlichen Gründen sind deshalb Kriterien, die den lokalen Gegebenheiten angepasst sind, sinnvoll.

Bild 5.12 zeigt die an drei verschiedenen Orten in einem Gebäude gemessenen Erschütterungen des gleichen Ereignisses. Deutlich erkennbar sind die unterschiedlichen Amplituden und Frequenzinhalte. Bei der Beurteilung von Erschütterungen ist es deshalb wichtig, dass die in den jeweiligen Normen spezifizierten Messstellen und Messprozeduren genau eingehalten sind. Ansonsten ist eine normgerechte Beurteilung nicht möglich.

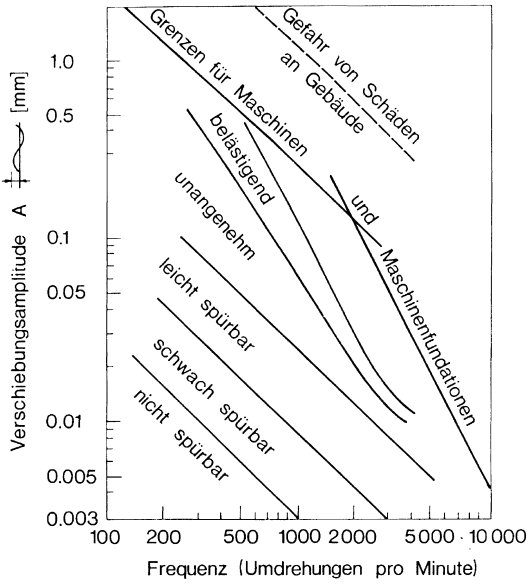

Bild 5.11. Allgemeine Grenzwerte der Wegamplitude für Erschütterungen (nach Richart et al., 1970)

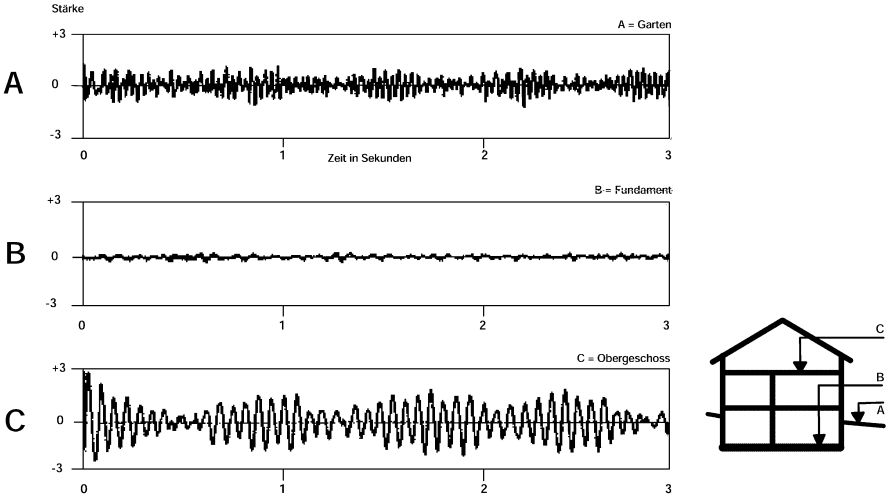

Bild 5.12. Gemessene Erschütterungsübertragung in einem Gebäude A: Garten, B: Fundament, C: Obergeschoss

5.2.1 Schäden an Bauwerken

Bauwerke sind bezüglich Erschütterungen relativ unempfindlich. Trotzdem können Schäden wie Risse im Verputz, Brüche von Fensterscheiben oder Keramikplatten etc. infolge Erschütterungen auftreten. Nur bei sehr starken Erschütterungen ist mit Schäden an der Tragstruktur zu rechnen. Was als Schaden an einem Bauwerk zu betrachten ist, hängt neben rein technischen Aspekten auch von gesellschaftlichen Normen ab. In Ländern mit ausgeprägtem Privateigentumsbegriff werden deshalb tiefere Grenzwerte angewandt als in Ländern, in denen der Eigentumsbegriff weniger stark ausgeprägt ist. Dieser Aspekt ist bei der Übernahme oder beim Vergleich von Grenzwerten aus verschiedenen Ländern stets zu berücksichtigen.

Schäden an Bauwerken hängen einerseits von der Erschütterung (Intensität, Frequenzinhalt, Erschütterungsart wie dauernd oder Einzelstoßwerte, etc.), andererseits vom Gebäude (Bautyp, Baumaterialien, Ausführungsqualität, etc.) ab. In den meisten Ländern hat sich in den letzten Jahren die gemessene Partikelschwinggeschwindigkeit als Referenzwert etabliert. Die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Größe im interessierenden Intensitäts- und Frequenzbereich die beste Korrelation zu den beobachteten Schäden ergibt. Während zur Beurteilung von Sprengerschütterungen im Allgemeinen Messungen an den Fundamentmauern zulässig sind, ist zur Beurteilung der übrigen Erschütterungseinwirkungen die maßgebende Messstelle (Ort der stärksten Erschütterungseinwirkung im Gebäude) durch breit abgestützte Vormessungen zu ermitteln (vgl. Bild 5.12). Unterschiede bei verschiedenen Normen bestehen einerseits darin, dass als Intensitätskriterium der Erschütterung der Absolutbetrag des Gesamtvektors oder

Tabelle 5.3. Richtlinien zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen auf Gebäude

Deutschland	– DIN 4150-3 (1999) Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche Anlagen. – VDI 2716 (2001 mit Berichtigungen 2003) Luft- und Körperschall bei Schienenbahnen des öffentlichen Personennahverkehrs
Schweiz	– SN 640 312 a (1992) Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke. Schweizerische Normenvereinigung SNV, Zürich
Österreich	– ÖNORM S 9020: Bauwerkserschütterungen; Sprengerschütterungen und vergleichbare impulsförmige Immissionen, 1986
Großbritannien	– BS 7385-1:1990, ISO 4866:1990 Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings – BS 7385-2:1993 Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide to damage levels from ground borne vibration
USA	– ANSI S2.47-1990 (R1997) Vibration of Buildings – Guidelines for the Measurement of Vibrations and Evaluation of Their Effects on Buildings
ISO-Normen	– ISO 4866 (1990) Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings

der Absolutbetrag einzelner Komponenten der Partikelschwinggeschwindigkeit gewählt werden, anderseits darin, dass Spitzen- bzw. Mittelwerte verwendet worden sind. Die entsprechenden Richtwerte sind in den einzelnen Ländern meistens auf Grund größerer Untersuchungen über durchgeführte Messungen festgelegt worden (siehe z. B. Studer und Süsstrunk, 1981). Sie beinhalten deshalb implizit die mittleren Bauqualitäten im entsprechenden Land. Es ist deshalb wiederum problematisch, verschiedene Normensysteme miteinander zu mischen. Die maßgebenden Normen sind in Tabelle 5.3 zusammengestellt.

Am Beispiel der schweizerischen Norm SN 640 312 a (1992) „Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke“ (vgl. Tabellen 5.4 bis 5.6) sollen einige Einflussfaktoren diskutiert werden.

Die Norm SN 640 312 a geht davon aus, dass solange die Richtwerte nicht überschritten werden, Schäden, die eine Wertminderung des Gebäudes bedeuten, unwahrscheinlich sind. Es sind Richtwerte und nicht Grenzwerte angegeben. Das heißt, dass noch nicht mit Schäden zu rechnen ist falls einzelne wenige Messungen die Richtwerte um weniger als 30 % überschreiten. Bei einem Überschreiten der Richtwerte – auch bei Einzelwerten – um 100 % ist allerdings auf Grund der Erfahrung mit einer erhöhten Schadenswahrscheinlichkeit zu rechnen. Ein Überschreiten der Richtwerte um das Zwei- bis Dreifache führt fast sicher zu Schäden.

Zum Festlegen der Richtwerte ist der Norm ein Schadenverursachungsmodell zugrunde gelegt worden. Es wird davon ausgegangen, dass die erzwungenen Schwingungen der einzelnen Bauelemente (Wände, Decken, etc.) zu Schäden führen. Die auftretenden Schäden resultieren aus dem Überschrei-

Tabelle 5.4. Häufigkeit der Einwirkungen während der gesamten Beurteilungsperiode: Jedes Überschreiten des 0,7-fachen Richtwertes des Bauwerkes gilt als Einwirkung (aus SN 640 312 a)

Häufigkeitsklasse	Anzahl der Ereignisse	Typische Erschütterungsquellen
gelegentlich	wesentlich kleiner als 1000	– Sprengungen – Verdichtungsgeräte und Vibrationsrammen, wenn sie nur beim Starten und Abstellen größere Schwingungen erzeugen
häufig		– häufige Sprengungen – Schlag- und Vibrationsrammen – Abdichtungsgeräte – Abbauhämmer bei gelegentlichem Einsatz – Notstromgruppen, die häufig in Betrieb genommen werden
permanent	wesentlich größer als 100 000	– Verkehr – festinstallierte Maschinen – Abbauhämmer bei längerem Einsatz

ten der lokalen Festigkeit infolge des Zusammenwirkens der Spannungen aus der Tragwerksfunktion des Gebäudes, Eigenspannungen (Zwängen, Schwinden, Temperatur, etc.) und der durch die Erschütterungen induzierten Spannungen. Letztere sind im Allgemeinen recht klein. Die Eigenschwingung des Gebäudes wird vernachlässigt, deshalb ist die Norm SN 640 312 a unterhalb 10 Hz nicht anwendbar.

Die Erschütterungen werden über den gemessenen oder prognostizierten maximalen Wert v_{Rmax} (mm/s) des Partikelgeschwindigkeits-Vektors beurteilt. Der Richtwert ist eine Funktion der Empfindlichkeit des Bauwerkes auf die Erschütterung, der Häufigkeit des Ereignisses und der dominanten Schwingfrequenz der gemessenen Erschütterung.

Die Norm SN 640 312 a klassiert Bauwerke bezüglich ihrer Empfindlichkeit gegen Erschütterungen. Bauwerke mit stärker schwingenden Bauteilen, mit Gipsverputz, Holzbalkendecken, Kachelböden etc. sowie Bauwerke, die schlecht unterhalten oder deren Bausubstanz schlecht ist, reagieren empfindlicher auf Erschütterungen als Bauwerke, die diese Eigenschaften nicht aufweisen. Tabelle 5.5 listet typische Vertreter der Empfindlichkeitsklassen auf. Während die meisten Hochbauten der Empfindlichkeitsklasse „normal“ angehören, können die meisten Tiefbauten der Empfindlichkeitsklasse „wenig empfindlich“ zugeordnet werden. Die in der Norm definierten Häufigkeitsklassen sollen die Ermüdungsgefahr berücksichtigen. Als zu zählendes „Ereignis“ gilt jedes Überschreiten des 0,7-fachen Richtwertes der entsprechenden Empfindlichkeitsklasse. Bei den Richtwerten sind drei Frequenzbereiche der Erschütterungen zu beachten. Im Bereich 10 bis 30 Hz liegen erfahrungsgemäß häufig Eigenfrequenzen von Bauteilen. Die Dämpfungswerte solcher Bauteile liegen eher tief. In diesem Frequenzbereich arbeiten oft Maschinen.

Tabelle 5.5. Empfindlichkeitsklassen (aus SN 640 312 a)

Empfindlichkeitsklasse	Hochbau	Tiefbau
(1) sehr wenig empfindlich		– Brücken in Stahlbeton oder Stahl – Stützbauwerke aus Beton, Stahlbeton oder massivem Mauerwerk – Stollen, Tunnel, Kavernen, Schächte in Festgestein oder gut verfestigtem Lockergestein – Kran- und Maschinenfundamente – Offen verlegte Rohrleitungen
(2) wenig empfindlich	– Industrie- und Gewerbebauten, in Stahlbeton oder Stahlkonstruktion, in der Regel ohne Mörtelverputz – Silos, Türme, Hochkamine in Massivbauweise ohne Mörtelverputz oder Stahlkonstruktion – Gittermasten → Voraussetzung: Die Bauwerke sind nach den allgemeinen Regeln der Baukunde gebaut und sind sachgerecht unterhalten	– Kavernen, Tunnel, Schächte, Rohrleitungen in Lockergestein – Unterirdische Parkbauten – Werkleitungen (Gas, Wasser, Kanalisation, Kabel), im Boden verlegt – Trockenmauern
(3) normal empfindlich	– Wohnbauten mit Mauerwerk in Beton, Stahlbeton oder künstlichen Bausteinen – Bürogebäude, Schulhäuser, Spitäler, Kirchen mit Mauerwerk oder künstlichen Bausteinen mit Mörtelverputz → Voraussetzung: Die Gebäude sind nach den allgemeinen Regeln der Baukunde gebaut und sind sachgerecht unterhalten	– Quellfassungen – Reservoire – Gusseisenleitungen – Kavernen, Zwischendecken und Fahrbahndecken in Tunneln – Empfindliche Kabel
(4) erhöht empfindlich	– Häuser mit Gips- oder Hourdisdecken – Riegelbauten – Neuerstellte und frisch renovierte Bauten der Klasse (3) – Historische und geschützte Bauten	– Alte Bleikabel – Alte Gussleitungen

Tabelle 5.6. Richtwerte in Funktion von Empfindlichkeitsklasse und Einwirkungshäufigkeit (aus SN 640 312 a)

Empfindlichkeitsklasse	Häufigkeit der Einwirkung	Richtwerte [mm/s]		
sehr wenig	gelegentlich häufig permanent	bis 3-mal der Werte von normal		
wenig	gelegentlich häufig permanent	bis 2-mal der Werte von normal		
normal		< 30 Hz	30 – 60	> 60 Hz
	gelegentlich	15	20	30
	häufig	6	8	12
	permanent	3	4	6
erhöht	gelegentlich häufig permanent	0,5 bis 1-mal der Werte von normal		

Messort: Ort mit der stärksten Einwirkung (empirisch zu ermitteln). Bei Sprengungen kann meist am Fundament, der Quelle zugewandt gemessen werden.
Messgröße: Spitzenwert des Vektors der Partikelgeschwindigkeit.
Randbedingungen: maßgebende Frequenz > 10 Hz.

Es ist deshalb mit ausgeprägten Resonanzüberhöhungen infolge Erschütterungseinwirkungen zu rechnen. Die Richtwerte sind deshalb hier am tiefsten. Im Bereich über 60 Hz sind Eigenfrequenzen von Bauteilen eher selten. Hohe Frequenzen sind für impulsartige Erschütterungen wie z. B. Sprengungen typisch. Resonanz-überhöhungen sind deshalb weniger zu erwarten. Die Richtwerte dürfen entsprechend höher angesetzt werden. Die Beurteilung des Zustandes des Bausubstanz ist ein wichtiger Parameter bei der Festlegung der Richtwerte. Da der Zustand der Bausubstanz schwierig in einer Norm festzulegen ist, sind die Richtwerte der verschiedenen Empfindlichkeitsklassen nur bestimmten Bereichen zugeordnet. Die Tabellen 5.4 bis 5.6 fassen die wichtigsten Elemente der Norm SN 640 312 a zusammen. Bild 5.13 zeigt ein typisches Beispiel einer Erschütterungsmessung.

Obwohl die Norm SN 640 312 a, wie jede Norm, ein Kompromisswerk verschiedenster Gesichtspunkte darstellt, ist sie ein gutes Beispiel dafür, wie durch die Kombination von statistischen Grundlagen mit auf theoretischen Ansätzen beruhenden Modellvorstellungen semi-empirische Verfahren erarbeitet werden können, die für die Praxis befriedigende Resultate ergeben.

5.2.2 Belästigung des Menschen

Die Beurteilung, ob Erschütterungen zumutbar sind, ist bei Einwirkungen auf den Menschen noch komplexer als bei Bauwerken. Neben rein technischen

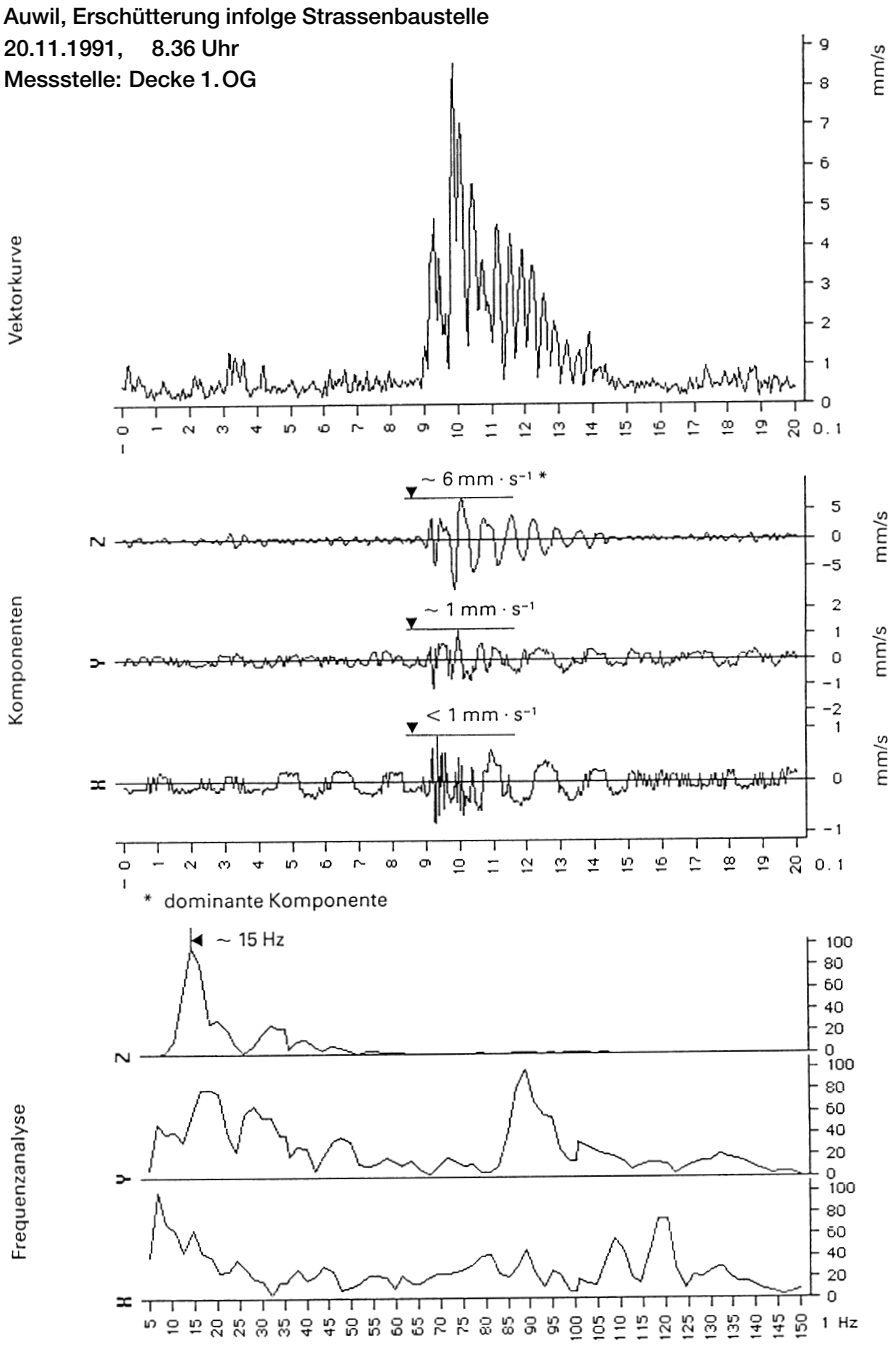

Bild 5.13. Beispiel: Erschütterungsverlauf (dargestellt Vektor v_R, Komponenten Z, Y, X; maßgebend: $v_{R\,max}$ = 8.5 mm/s, Z-Komponente hat die tiefste dominante Frequenz, etwa 15 Hz) (aus Norm SN 640312a)

Tabelle 5.7. Faktoren für die Beurteilung der Belästigung durch Erschütterungen

Problemkreis	Kriterien zur Beurteilung
Erschütterung	• Stärke • Vereinzelt auftretend oder dauernd • Anzahl der Ereignisse pro Zeiteinheit • Tageszeit (nachts/tags)
Bewohner	• Tätigkeit (Arbeit, Ruhe etc.) • Position (stehend, sitzend etc.) • Gesundheitszustand (gesund/krank) • Gewöhnung
Umgebung	• weitere Störeinflüsse (Kombinationen) • Immissionsvorbelastung

und physiologischen Aspekten spielen auch soziale und psychologische Faktoren, so etwa die persönliche Einstellung zum Erschütterungsproduzenten, eine wichtige Rolle. Tabelle 5.7 stellt die wesentlichen Einflussfaktoren, die beim Festlegen von Beurteilungswerten berücksichtigt werden sollten, zusammen. Bis heute liegen noch immer keine international anerkannten Richtwerte vor. Dafür bestehen heute in vielen Ländern Richtlinien zur Beurteilung der Belästigung von Menschen. Sie berücksichtigen in unterschiedlichem Maße die in Tabelle 5.7 aufgezeigten Faktoren. Tabelle 5.8 zeigt die in den europäischen Ländern und den USA hauptsächlich verwendeten Regeln.

Ein international verwendetes Regelwerk zur Beurteilung von Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden ist die ISO 2631-2. In den deutschsprachigen Ländern wird am häufigsten die DIN 4150/2 verwendet. Bis 1999 benutzten die Schweizerischen Bundesbahnen eigene Richtwerte, die etwas weniger streng waren. Seit 1999 findet die DIN 4150/2 in der Schweiz Anwendung. In Österreich dient seit 1996 die ÖNORM S 9012 zur Beurteilung der Einwirkung von Schienenverkehrsimmissionen auf Menschen in Gebäuden. Im Gegensatz zu allen anderen hier erwähnten Regelwerken weist die ÖNORM S 9012 den Vorteil auf, dass sie sowohl die eigentlichen Schwingungen wie auch den in Gebäuden von Wänden und Decken abgestrahlten sekundären Luftschall abdeckt.

Die wichtigsten Unterschiede zwischen den einzelnen Regelwerken liegen bei der Beurteilung vorübergehend andauernder Erschütterungen, die weder als Dauer- noch als Einzelereignisse betrachtet werden können, sowie der Frequenzgewichtung. Die dazu verwendeten Umrechnungsprozeduren und die Beurteilungswerte sind unterschiedlich, so dass ein gemessenes Ereignis je nach verwendeter Norm unterschiedlich beurteilt wird. Dies zeigen die Bilder 5.14 und 5.15 deutlich. Das gleiche gemessene Ereignis wird je nach Norm als mehr oder weniger zulässig betrachtet. Dies zeigt deutlich, dass Richtwerte zur Beurteilung der Belästigung des Menschen, aber auch zur Vermeidung von Schäden bei Bauwerken, gesellschaftspolitische Entscheide des entsprechenden Landes sind und sich nicht rein durch naturwissenschaftliche Betrachtungen begründen lassen. Bei der Anwendung von Normen außerhalb deren Ursprungslandes ist deshalb Vorsicht geboten.

Die Betrachtung der spürbaren Erschütterungen ist nur ein Teil der Fragestellung. In geschlossenen Räumen wird durch höherfrequente Vibrationen von Decke, Boden und Wänden die Luft zu einem hörbaren Geräusch angeregt. Dieses wird sekundärer Luftschall oder abgestrahlter Körperschall genannt. Es handelt sich um ein meist tieffrequentes Geräusch, das im Raum nicht lokalisiert werden kann. Ein Beispiel ist etwa das Rumpeln in einem Zimmer infolge Vorbeifahrt eines Zuges in einem nahegelegenen Tunnel. Dieser Effekt wird weder vom BS 6472 noch von der DIN 4150/2 erfasst. Sekundärer Luftschall ist durch Kriterien des Luftschalles zu beurteilen. Dabei muss

Tabelle 5.8. Richtlinien zur Beurteilung der Belästigung von Menschen

Deutschland	– DIN 4150-2 (1999) Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden. DIN Deutsches Institut für Normung – VDI 2057 (2002) Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Blatt 1, 2 und 3, VDI Verein Deutscher Ingenieure
Frankreich	– AFNOR E90-401-3 (1992) Vibrations et chocs mécaniques – Méthode de mesurage et d'évaluation des vibrations globales du corps humain dans les bâtiments et autres constructions terrestres, Association Française de Normalisation
Großbritannien	– BS 6472 (1992) Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 to 80 Hz) British Standards Institutions – BS 6841 (1987) Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shocks. British Standards Institutions
ISO-Normen	– ISO 2631-1 (1997) Evaluation of human exposure to whole-body vibration; Part 1: General Requirements. International Standard Organization – ISO 2631-2 (2003) Evaluation of human exposure to whole-body vibration; Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). International Standard Organization
Österreich	– ONORM S 9012 (1996) Beurteilung der Einwirkung von Schienenverkehrsimmissionen auf Menschen in Gebäuden; Schwingungen und sekundärer Luftschall
Schweiz	– BEKS (1999), Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS), Bundesamt für Umwelt, Land und Landschaft (BUWAL), 20. Dezember 1999 – Voraussichtlich im Jahr 2007 wird die BEKS durch eine neue Verordnung VSE (Verordnung zu Schutz vor Erschütterungen) abgelöst. Darin wird der Schutz des Menschen vor Erschütterungen und Körperschall aus Verkehrs- und industriell und gewerblichen Anlagen geregelt. Bezüglich der Erschütterungen folgt sie weit gehend der DIN 4150-2 (1999), beim Körperschall werden neue Wege der Beurteilung beschritten
USA	– ANSI S3.29-1983 (R2001) American National Standard Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings

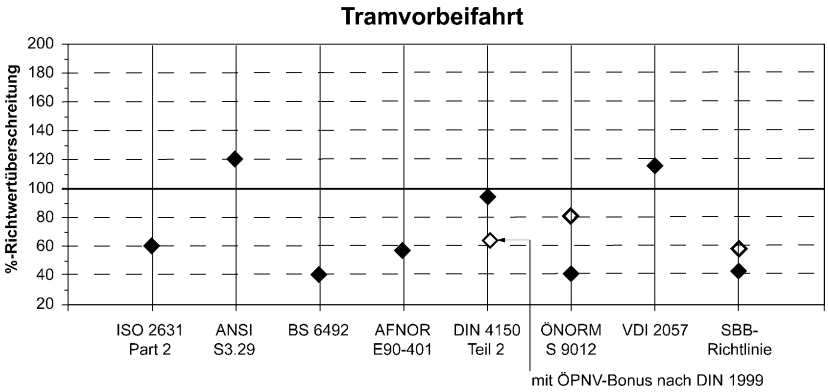

Bild 5.14. Beispiel eines Vergleichs der Beurteilung der Vorbeifahrt einer Straßenbahn mit verschiedenen Normen (Rutishauser, 2005)

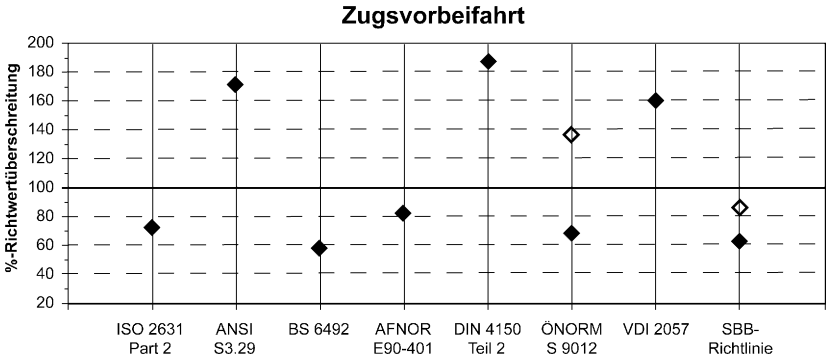

Bild 5.15. Beispiel eines Vergleichs der Beurteilung mit verschiedenen Normen bei Zugsfahrten (Rutishauser, 2005)

berücksichtigt werden, dass die üblichen Grenzwerte nur für Außenlärm gelten. Sekundärer Luftschall wirkt aber besonders unangenehm, da man sich ihm nicht entziehen kann, indem man etwa die Fenster schließt oder sich in einen der Quelle abgewandten Raum begibt.

Bild 5.16 zeigt deutlich, dass im Bereich über 50 Hz im Allgemeinen der sekundäre Luftschall das maßgebende Kriterium darstellt. Aus diesem Grunde sind bei breitbandigen Erschütterungen stets beide Kriterien, fühlbare Erschütterungen und sekundärer Luftschall, zu berücksichtigen. Zur Beurteilung kann die ÖNORM S 9012 (1996), „Beurteilung der Einwirkung von Schienenverkehrsimmissionen auf Menschen in Gebäuden; Schwingungen und sekundärer Luftschall“ herangezogen werden. Sie behandelt beide Aspekte. Andernfalls können auch Außenlärmwerte mit Abzug für geschlossene Fenster (mittleres Fenster ca. 40 dB (A) Abzug) oder Innenlärmwerte z.B. für Aufzuganlagen etc. (z. B. SIA 181 „Schallschutz im Hochbau“) verwendet werden. Die neue Schweizerische Erschütterungsverordnung gibt Grenzwerte, die im

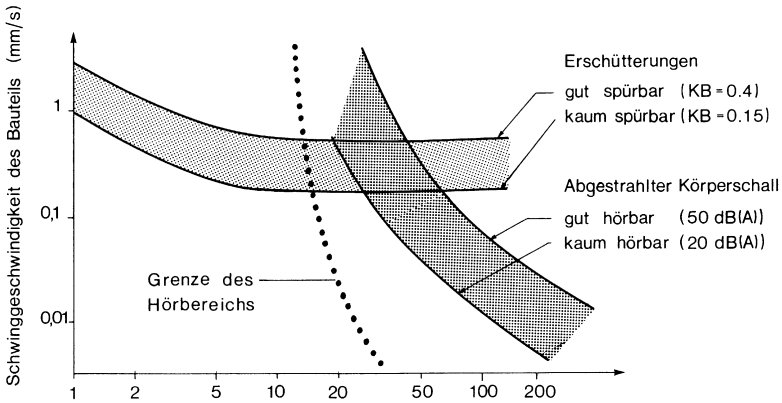

Bild 5.16. Maßgebende Bereiche für Erschütterungen und sekundären Luftschall

Rahmen der Umweltschutzgesetzgebung gültig sind. In diesem Zusammenhang muss aber erwähnt werden, dass die Schutzziele der Umweltschutzgesetzgebung – Schutz vor erheblicher Belästigung der Menschen – in der Regel weniger streng sind als zum Beispiel der Anspruch eines Bauherrn oder eines Bewohners an ein Haus mit hohem Wohnkomfort. Weitere Hinweise zur Analyse von Körperschall gibt Müller&Möser (2004).

5.2.3
Grenzwerte für Geräte

In innerstädtischen Verhältnissen gilt es oft zu beurteilen, inwieweit Erschütterungen stationäre Geräte wie z. B. Computer, Elektronenmikroskope, Waagen etc. beschädigen oder am einwandfreien Funktionieren hindern können. Die Empfindlichkeit solcher Geräte ist sehr unterschiedlich. Hinweise von Herstellern liegen oftmals sehr stark auf der sicheren Seite. Manchmal lohnt es sich deshalb, die tatsächliche vorhandenen Erschütterungen bei Geräten zu messen, die einwandfrei funktionieren, um ein realistischeres Bild zu erhalten.

Richtwerte für empfindliche Geräte lassen sich in den in Tabelle 5.9 aufgeführten Normen finden. Bezüglich Schwingungsanforderungen in der Nanotechnik geben Heiland & Beyer (2005) eine ausgezeichnete Übersicht.

Transportable Geräte sind bezüglich Beschädigung und Betrieb normalerweise unkritisch.

Tabelle 5.9. Richtwerte für Geräte

ISO 8569:1996	Mechanical vibration and shock – Measurement and evaluation of shock and vibration effects on sensitive equipment in buildings
ISO/TS 10811-1:2000	Mechanical vibration and shock – Vibration and shock in buildings with sensitive equipment – Part 1: Measurement and evaluation
ISO/TS 10811-2:2000	Mechanical vibration and shock – Vibration and shock in buildings with sensitive equipment – Part 2: Classification

5.3 Erschütterungsreduktion

Reduktionsmaßnahmen können unterschiedliche Strategien verfolgen. Einerseits kann versucht werden die Entstehung, die Übertragung oder die Ausbreitung von Erschütterungen zu unterbinden oder zumindest abzumildern, also die Beanspruchung zu reduzieren. Andererseits können Maßnahmen auch die Auswirkungen bzw. die Empfindlichkeit gegenüber Erschütterungen herabsetzten, also den Widerstand erhöhen.

Maßnahmen können nach deren Art unterschieden werden:

- Mit baulichen Maßnahmen kann vor allem die Schwingungsübertragung und -ausbreitung beeinflusst werden. Bauliche Eingriffe sind aber in der Regel kosten- und zeitaufwändig.
- Durch Änderungen und Anpassungen beim Betrieb von Erschütterungserzeugern, aber auch über Einschränkungen beim Betrieb von Geräten auf der Empfängerseite lassen sich negative Auswirkungen häufig vermindern oder umgehen.
- Oftmals genügen organisatorische Maßnahmen, um negative Auswirkungen zu vermindern oder zu umgehen.

Weiter lässt sich unterscheiden, wo die Maßnahme ergriffen wird (vgl. Tabelle 5.10). Am wirkungsvollsten zeigen sich Maßnahmen an der Quelle mit dem Ziel, möglichst wenig Schwingungsenergie in die Umgebung abzustrahlen. Maßnahmen im Übertragungsmedium sind nur bei besonders günstigen Voraussetzungen wirkungsvoll.

Es ist zu beachten, dass Reduktionsmaßnahmen Immissionsprobleme auch verlagern können. Beispielsweise wurde beobachtet, dass Maßnahmen an Gleisen (Unterschottermatten oder ähnliches) zwar die Körperschallimmission reduzierten, die Erschütterungen jedoch verstärkten.

5.3.1 Bauliche Maßnahmen bei der Quelle

Bei Maßnahmen an der Quelle gilt es im Allgemeinen, die in das Übertragungsmedium abgestrahlte Energie möglichst stark zu reduzieren. Derartige Maßnahmen sind z. B. bei Sprengungen: kurz aufeinander folgende Sprengstufen oder ein optimiertes Sprengschema; bei Maschinen z. B. Lagerung auf Dämpfungselementen. Damit lassen sich viele, aber bei weitem nicht alle Probleme lösen. Werden beim Empfänger Resonanzen angeregt, so bewirkt die Reduktion der Erschütterungsintensität bei der Quelle meist keine hinreichende Abminderung. In diesem Fall kann aber eine leichte Veränderung der Anregungsfrequenz bei der Quelle viel bewirken. Da bei Bauten viele Eigenfrequenzen sehr nahe beieinander liegen, kann aber eine nur wenig veränderte Anregungsfrequenz zu größeren Erschütterungen bei einem anderen Empfänger führen.

Der Wirkungsgrad von Maßnahmen, welche die ans Übertragungsmedium abgestrahlte Energie vermindern, ist analytisch oft nicht zu bestimmen. Beim

Tabelle 5.10. Erste Entscheidungshilfe über wirkungsvolle oder kosteneffiziente Maßnahmen

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, z. B. neue Bahnlinien 4. temporäre Quellen, z. B. Quellen während dem Bau 5. fixe Quellen, d. h. 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 aufwändig, z. B. Bahnlinie unter Betrieb
… beim *Empfänger*: 9. viele Quellen bzw. weite Ausdehnung der Quelle (Linienquelle) und ein Empfänger 10. Empfänger eindeutig definiert 11. Empfängerneubauten

Sprengen wird man deshalb den Wirkungsgrad mit Versuchssprengungen überprüfen. Bei Maschinenfundamenten, die auf Feder- und Dämpfungselementen fundiert sind, kann der Reduktionsfaktor der einstrahlenden Erschütterungen mit den Methoden von Kap. 2.4 ermittelt werden.

Bild 5.17 gibt einen Überblick über die mit verschieden handelsüblichen Materialien erreichbaren Systemeigenfrequenzen und die daraus resultierenden Bauhöhen.

In der Praxis zeigt sich, dass Erschütterungen infolge schienengebundenem Verkehr im Nahbereich oft zu einer Belästigung der Anwohner werden. Zur Reduktion solcher Erschütterungen sind verschiedene effiziente Maßnahmen entwickelt worden. Sie reichen von sogenannten Unterschottermatten (Gummi oder elastische Kunststoffmatten als Unterlage für das Schotterbett) über leichte bis zu schweren Feder-Masse-Systemen. Letztere haben den besten Wirkungsgrad, sind aber auch am kostspieligsten. Bild 5.18 zeigt ein schweres Feder-Masse-System. Die Wirksamkeit dieses Systems kann, wie das Bild zeigt, mit den Methoden von Kapitel 2.4 ermittelt werden und wird durch betriebliche Sicherheitsanforderungen der Bahn bestimmt (beeinträchtigte Gleisstabilität bei zu weicher Lagerung).

Im Rahmen dieses Buches wird auf die weitere Beschreibung detaillierter Maßnahmen zur Erschütterungsreduktion verzichtet. Entsprechende Hinweise finden sich in folgenden Fachbüchern: Krüger et al. (2001), Melke (1995), Müller&Möser (2004).

Es ist nochmals darauf hinzuweisen, dass auch durch eine tiefe Admittanz die Energieübertragung in den Untergrund wesentlich reduziert wird (vgl. z. B. Bild 5.5).

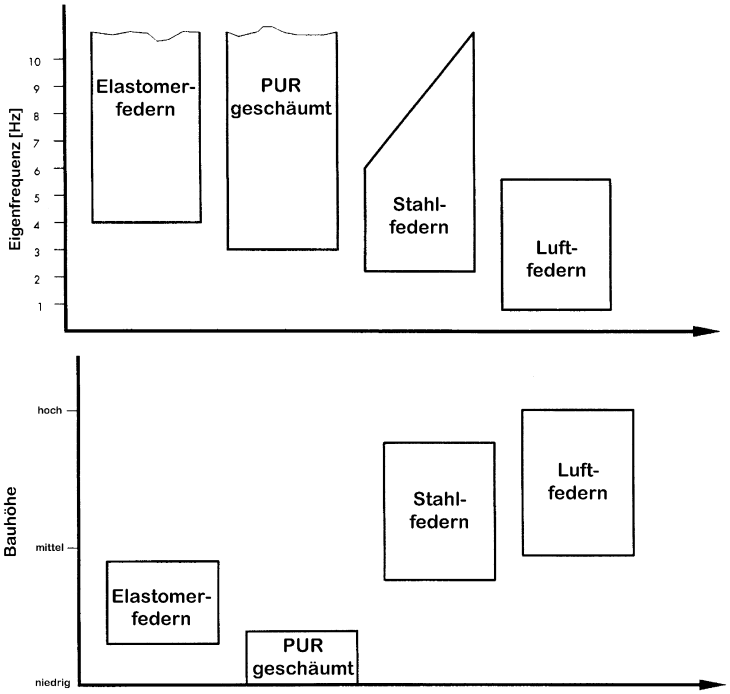

Bild 5.17. Mit verschiedenen Materialien erreichbare Systemeigenfrequenzen und dazu notwendige Bauhöhen.

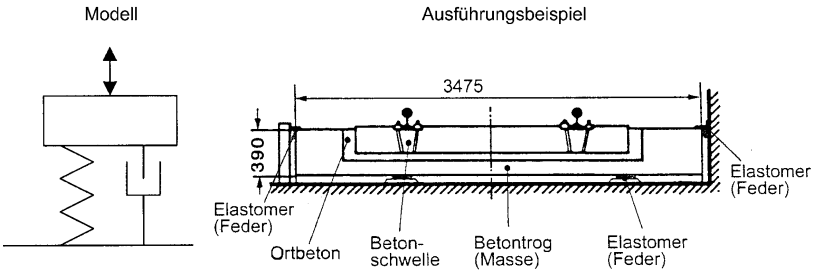

Bild 5.18. Feder Masse-System

5.3.2
Bauliche Maßnahmen auf dem Übertragungsweg

Maßnahmen auf dem Übertragungsweg sind beschränkt. Kapitel 6.1.3. zeigt, dass ein vertikal schwingendes Fundament für hinreichend tiefe Frequenzen den Großteil der erzeugten Energie in Form von Rayleighwellen abstrahlt. Es ist demnach naheliegend, den Übertragungsweg an der Oberfläche mit Hilfe von Schlitzen (Bild 5.19), die entweder offen bleiben oder ausbetoniert werden, zu unterbrechen. Solche Schlitze werden in der Praxis mit wechselndem

Erfolg eingesetzt. Die Wirksamkeit von Schlitzen verschiedenster Art wurde sowohl experimentell wie auch rechnerisch eingehend untersucht. Resultate einer solchen experimentellen Untersuchung zeigt Bild 5.20.

In Bild 5.20 ist die Abschirmwirkung eines langgezogenen Schlitzes deutlich zu erkennen. Gleichzeitig bemerkt man, dass sie einerseits sehr unregelmäßig verteilt ist und dass Zonen entstanden sind, in denen mit verstärkten Erschütterungen zu rechnen ist. Dass die Abminderung auch nur auf eine beschränkte Distanz vom Schlitz wirksam ist, zeigt Bild 5.20 b deutlich.

Eine Zusammenfassung von experimentellen und rechnerischen Untersuchungen über die Abschirmwirkung von Schlitzen und Bohrlochreihen zeigt Bild 5.21. Da mit Schlitzen der Übertragungsweg von Rayleighwellen unterbrochen werden soll, ist es einleuchtend, dass die Abmessungen des Schlitzes in einem bestimmten Verhältnis zur Rayleigh-Wellenlänge L_R sein müssen. Woods (1968) zeigt, dass ein maximaler Reduktionsfaktor R von etwa 0,25 im Fernfeld erreicht werden kann, wenn die Schlitztiefe h etwa 1,2 bis 1,5 L_R beträgt. Dolling (1970) zeigt, dass für das Nahfeld eine Schlitztiefe von 0,6 L_R ausreicht.

Die Abschirmwirkung eines mit Beton gefüllten Schlitzes ist in Bild 5.21a dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Abschirmwirkung von einem normierten Querschnitt $\bar{a} = Bh$ abhängt.

Die Abhängigkeit der Abschirmwirkung eines offenen Schlitzes zeigt Bild 5.21b. Dargestellt sind der Reduktionsfaktor R nach theoretischen Berechnungen von Dolling (1970) (Annahme totaler Reflexion der R-Wellen) sowie experimentelle Resultate von Woods (1968) und Haupt (1981). Für das Nahfeld ergibt die Theorie von Dolling eine gute Vorhersage. Weitere Erkenntnisse ergeben sich aus Zentrifugenmodellversuchen (z. B. Laue et al. 1996, Siemer, 1997).

Die Abschirmwirkung einer Reihe von Bohrlöchern zeigt Bild 5.21c. Der Reduktionsfaktor ist in Abhängigkeit einer normierten Abschirmfläche $\bar{B}$ dargestellt. Die Abschirmwirkung ist wesentlich geringer als für den offenen Schlitz. Dies ist einleuchtend, besitzt doch die Bohrlochwand eine große Anzahl von „Schallbrücken“. In einem Lockergestein müssen die Bohrlöcher zumeist verrohrt werden, was die Abschirmwirkung weiter herabsetzt.

Die Resultate der experimentellen und analytischen Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Offene Schlitze sind wirksamer als gefüllte und unterbrochene Schlitze.
- In homogenen Verhältnissen lässt sich ein Reduktionsfaktor von bestenfalls 0,25 erreichen. In geschichteten Böden ist die Abschirmwirkung im Allgemeinen geringer.
- Schlitzlänge und Schlitztiefe müssen ein bestimmtes Verhältnis zur Wellenlänge haben. Schlitze sind deshalb bei schmalbandigen Erschütterungen am wirksamsten.
- Das zu schützende Objekt soll nahe beim Schlitz liegen. Liegt es zu weit vom Schlitz weg, wird die Wirkung stark reduziert.
- Vor dem Schlitz und seitwärts können durch Reflexionen und Überlagerungen gegenüber der Situation ohne Schlitz stärkere Erschütterungen auftreten.

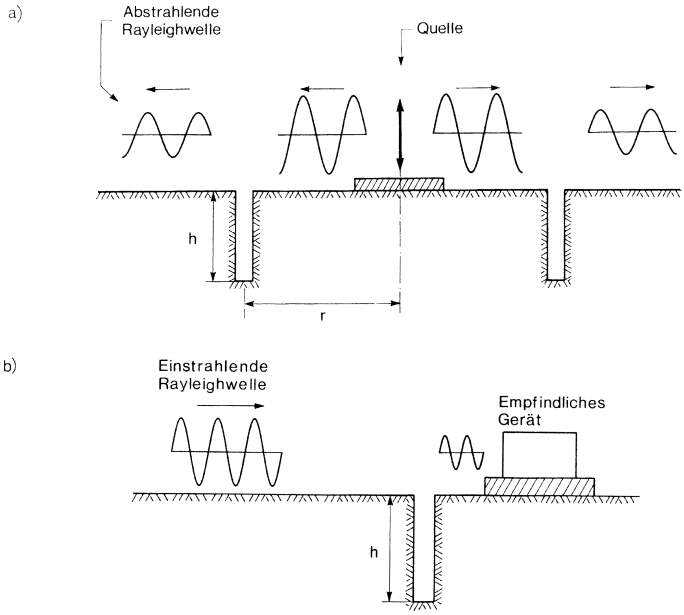

Bild 5.19. **a** Isolation der Quelle, **b** Isolation eines empfindlichen Empfängers

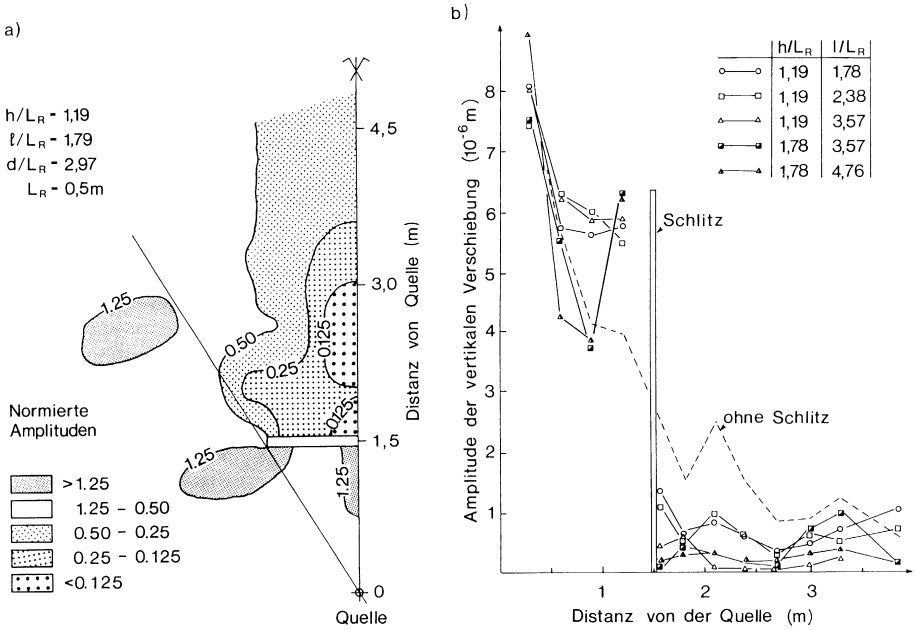

Bild 5.20. Abschirmwirkung von offenen Schlitzen; **a** Normierte Amplituden, h = Schlitztiefe, l = Schlitzlänge, d = Distanz von der Quelle, L_R = Rayleighwellenlänge; **b** Vertikale Verschiebungsamplituden in Abhängigkeit der Entfernung (nach Woods, 1968)

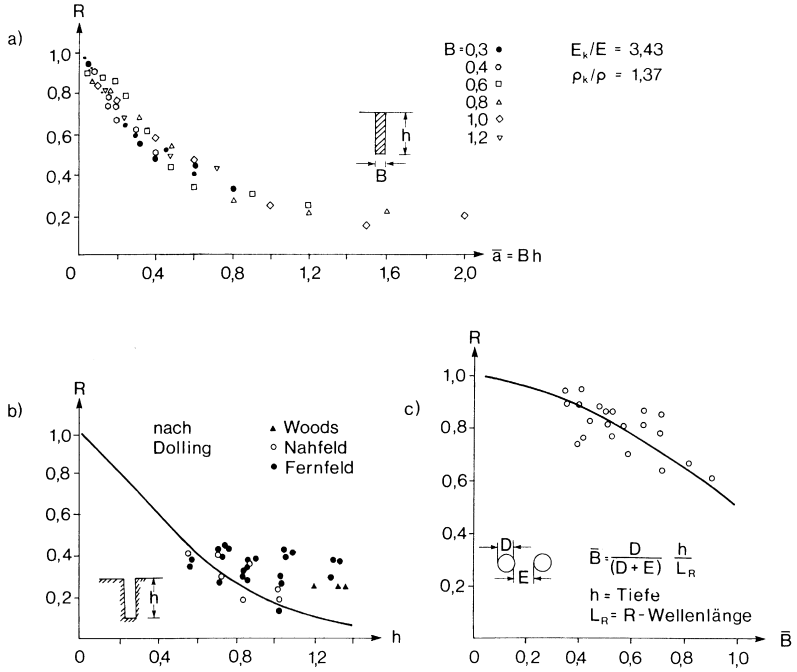

Bild 5.21. Abschirmung von Schlitzen; **a** Mit Beton gefüllter Schlitz, E_k/E = Verhältnis des E-Moduls vom Schlitz zum umgebenden Boden, ϱ_k/ϱ = Verhältnis der Dichten; **b** offener Schlitz; **c**) Bohrlochreihe (Haupt, 1981)

- Die Wirksamkeit namentlich offener Schlitze muss auch über längere Zeit sichergestellt bleiben. Dies versucht man z.B. mit Hilfe gasgefüllter Geomembranen zu gewährleisten. Deren Langzeitverhalten ist heute jedoch noch nicht gut genug gesichert.
- In geschichtetem Boden ist die Wirksamkeit von Schlitzen schwierig vorherzusagen.

Namentlich aus dem zuletzt aufgeführten Grund haben sich Schlitze zur Reduktion von Erschütterungen in der Praxis nur in Ausnahmefällen durchsetzen können.

5.3.3
Maßnahmen beim Empfänger

Als Maßnahmen beim Empfänger kommen im Wesentlichen die folgenden Möglichkeiten in Frage:

- Änderung der Auflagerverhältnisse,
- Anbringen eines Schwingungstilgers.

Eine Änderung der Auflagerverhältnisse bewirkt eine frequenzmäßige Verstimmung, mit der erreicht werden kann, dass der Empfänger weniger stark zu Schwingungen angeregt wird. Es können je nach den Lasten und der angestrebten Verstimmung Stahl-, Gummi- oder Luftfedern, zum Teil in Kombination mit Dämpfern, verwendet werden. Auf dem Markt ist eine Vielzahl von solchen Produkten vorhanden. Die Wirksamkeit kann gut mit den in Kap. 2 beschriebenen Methoden berechnet werden.

Schwingungstilger sind bisher in der Praxis eher selten eingesetzt worden. Es handelt sich um schwingungsfähige Systeme, die dem Hauptschwingsystem zugefügt werden und frequenzmäßig derart abgestimmt sind, dass die im Tilger induzierten Kräfte der Schwingung des Hauptsystems entgegenwirken (vgl. z. B. Bachmann und Ammann, 1987).

Schwingungstilger sind nur im schmalbandigem Frequenzband wirksam, auf das sie abgestimmt werden.

http://www.springer.com/978-3-540-29624-9

Bodendynamik
Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze
Studer, J.A.; Laue, J.; Koller, M.
2008, XVIII, 340 S., Hardcover
ISBN: 978-3-540-29624-9