

Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke

(Dr. Jost A. Studer, Studer Engineering, Thujastrasse 4, CH-8038 Zürich)

Beurteilung von 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 er im konkreten Fall als massgebend betrachtet, wird er andere Beurteilungskriterien anwenden. Bild 1 zeigt deutlich, dass der Mensch bereits Erschütterungen spürt, die noch keine Schäden an Gebäuden hervorrufen. Erschütterungen, die Schäden an Gebäuden verursachen, werden vom Menschen bereits als belästigend empfunden. Aus wirtschaftlichen Gründen ist deshalb die Verwendung von Kriterien, die den lokalen Gegebenheiten angepasst sind, sinnvoll.

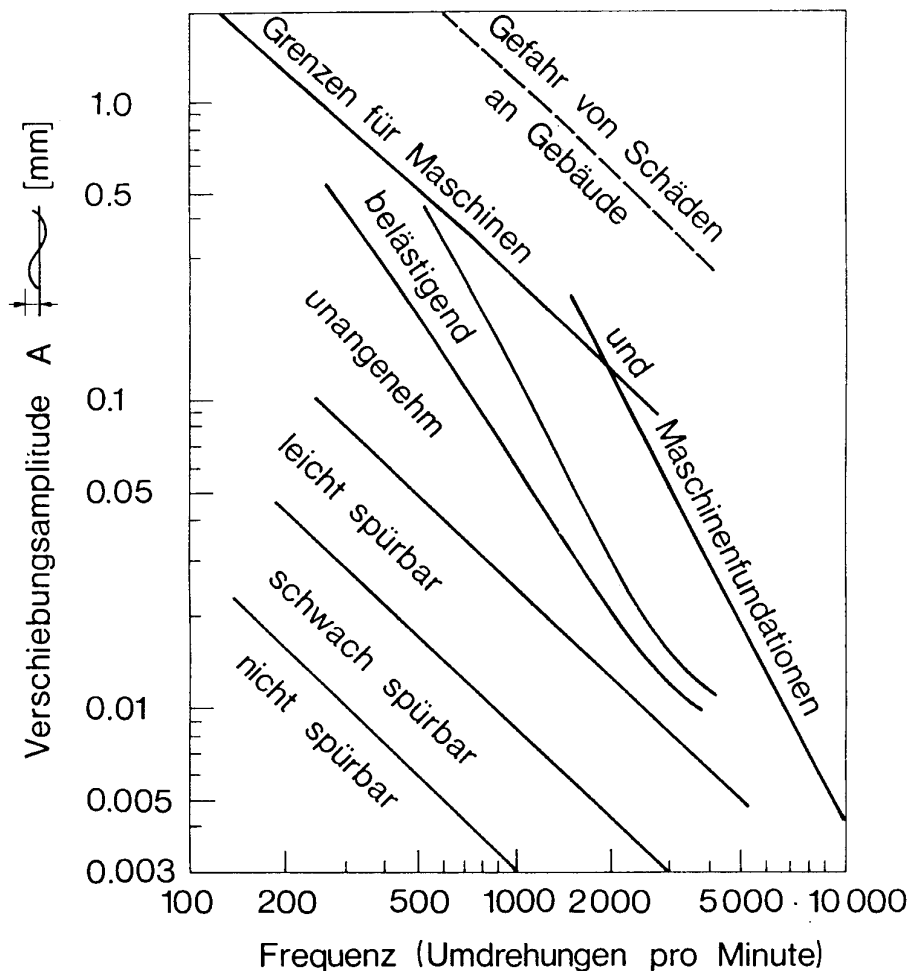


Bild 1: Allgemeine Grenzwerte der Wegamplitude für Erschütterungen (nach Richart et al., 1970)

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. Unterschiede bei verschiedenen Normen bestehen einerseits darin, dass als Intensitätskriterium der Erschütterung der Absolutbetrag des Gesamtvektors oder der Absolutbetrag einzelner Komponenten der Partikelschwinggeschwindigkeit, andererseits, dass Spitzen- bzw. Mittelwerte gewählt 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 Süssstrunk, 1981). Sie beinhalten deshalb implizit die mittleren Bauqualitäten im entsprechenden Land. Es ist deshalb wiederum problematisch, verschiedene Normensysteme miteinander zu mischen. Am Beispiel der schweizerischen Norm SN 640 312 a (1992) "Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke" (vgl. Tabellen 1 bis 3) 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, falls einzelne wenige Messungen die Richtwerte um weniger als 30% überschreiten, noch nicht mit Schäden zu rechnen ist. 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 den Schäden führen. Die auftretenden Schäden resultieren aus dem Überschreiten 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 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.

Häufigkeitsklasse	Anzahl der Ereignisse	Typische Erschütterungsquellen
Gelegentlich	Wesentlich kleiner als 1000	<ul style="list-style-type: none"> - Sprengungen - Verdichtungsgeräte und Vibrationsrammen, wenn sie nur beim Starten und Abstellen grössere Schwingungen erzeugen
Häufig		<ul style="list-style-type: none"> - Häufige Sprengungen - Schlag- und Vibrationsrammen - Abdichtungsgeräte - Abbauhämmer bei gelegentlichem Einsatz - Notstromgruppen, die häufig in Betrieb genommen werden
Permanent	Wesentlich grösser als 100'000	<ul style="list-style-type: none"> - Verkehr - Fest installierte Maschinen - Abbauhämmer bei längerem Einsatz

Tabelle 1: Häufigkeit der Einwirkungen während der gesamten Beurteilungsperiode: Jedes Überschreiten des 0,7-fachen Richtwertes des Bauwerkes gilt als Einwirkung (aus SN 640 312 a)

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 2 zeigt typische Vertreter der Empfindlichkeitsklassen.

Empfindlichkeitsklasse	Hochbau	Tiefbau
(1) Sehr wenig empfindlich		<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - Industrie- und Gewerbebauten, in Stahlbeton oder Stahlkonstruktion, in der Regel ohne Mörtelverputz - Silos, Türme, Hochkamine in Massivbauweise ohne Mörtelverputz oder Stahlkonstruktion - Gittermasten <p><u>Voraussetzung:</u> Die Bauwerke sind nach den allgemeinen Regeln der Baukunde gebaut und sind sachgerecht unterhalten</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Kavernen, Tunnel, Schächte, Rohrleitungen in Lockergestein - Unterirdische Parkbauten - Werkleitungen (Gas, Wasser, Kanalisation, Kabel), im Boden verlegt - Trockenmauern
(3) Normal empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> - Wohnbauten mit Mauerwerk in Beton, Stahlbeton oder künstlichen Bausteinen - Bürogebäude, Schulhäuser, Spitäler, Kirchen mit Mauerwerk oder künstlichen Bausteinen mit Mörtelverputz <p><u>Voraussetzung:</u> Die Gebäude sind nach den allgemeinen Regeln der Baukunde gebaut und sind sachgerecht unterhalten</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Quelfassungen - Reservoirs - Gusseisenleitungen - Kavernen, Zwischendecken und Fahrbahndecken in Tunneln - Empfindliche Kabel
(4) Erhöht empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> - Häuser mit Gips- oder Hourdisdecken - Riegelbauten - Neuerstellte und frisch renovierte Bauten der Klasse (3) - Historische und geschützte Bauten 	<ul style="list-style-type: none"> - Alte Bleikabel - Alte Gussleitungen

Tabelle 2: Empfindlichkeitsklassen (aus SN 640 312 a)

Empfindlichkeitsklasse	Häufigkeit der Einwirkung	Richtwerte (mm/s)		
Sehr wenig empfindlich	gelegentlich häufig permanent	bis 3mal die Werte von normal		
Wenig empfindlich	gelegentlich häufig permanent	bis 2mal die Werte von normal		
Normal empfindlich	gelegentlich häufig permanent	<30Hz 15 6 3	30-60 20 8 4	>60Hz 30 12 6
Erhöht empfindlich	gelegentlich häufig permanent	0,5 bis 1 mal die Werte von normal		

Tabelle 3: Richtwerte in Funktion von Empfindlichkeitsklasse und Einwirkungshäufigkeit (aus SN640312a)

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. 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. Resonanzüberhöhungen sind deshalb weniger zu erwarten. Die Richtwerte dürfen entsprechend höher angesetzt werden. Die Beurteilung des Zustandes der 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 1 bis 3 fassen die wichtigsten Elemente der Norm SN 640 312 a zusammen. Bild 2 zeigt ein typisches Beispiel einer Erschütterungsmessung.

Auwil, Erschütterung infolge Strassenbaustelle
 20.11.1991, 8.36 Uhr
 Messstelle: Decke 1.OG

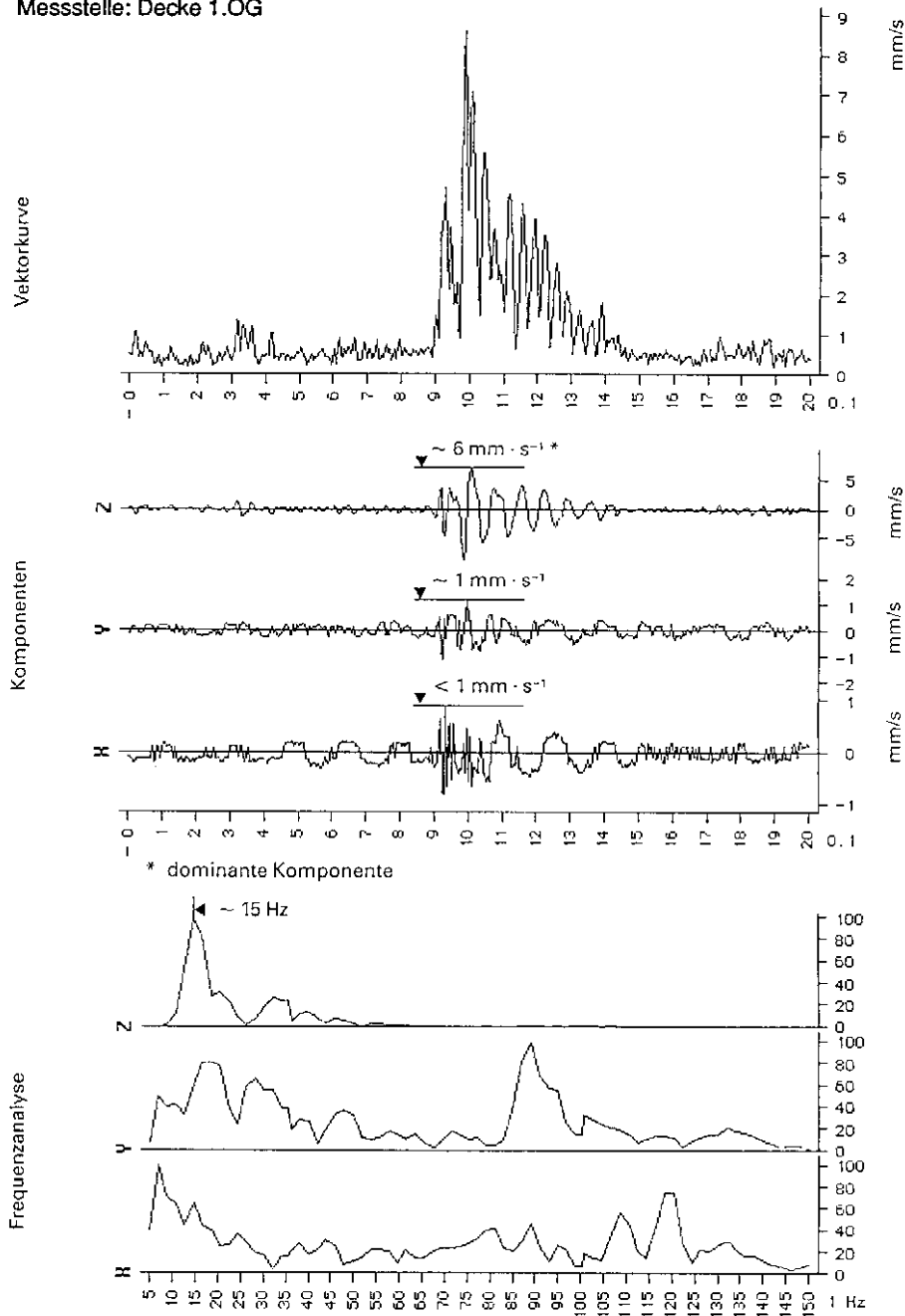


Bild 2: Beispiel einer Erschütterungsmessung (aus SN640312a)

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 semiempirische Grundlagen erarbeitet werden können, die für die Praxis befriedigende Resultate ergeben.

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 herabsetzen, also den Widerstand erhöhen.

Massnahmen können nach der Art unterschieden werden:

- Mit baulichen Massnahmen kann vor allem die Schwingungsübertragung und -ausbreitung beeinflusst werden. Bauliche Eingriffe sind aber in der Regel kosten- und zeitaufwendig.
- Durch Änderungen und Anpassungen beim Betrieb von Erschütterungserzeugern, aber auch über Einschränkungen beim Betrieb von Geräten auf der Empfängerseite lassen sich negative Auswirkungen oft 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 4). 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 auch schon beobachtet, dass Massnahmen an Geleisen (Unterschottermatten oder ähnliches) zwar die Körperschallimmission reduzierten, die Erschütterungen jedoch verstärkten.

Randbedingungen und Einflussfaktoren, welche den günstigsten Standort der Massnahme bestimmen:
Massnahmen...
.. bei der <i>Quelle</i> : 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 <i>Übertragungsmedium</i> : 7. breitbandiger und hochfrequenter Frequenzbereich der Anregung 8. Massnahmen an der Quelle betrieblich und technisch zu aufwendig, z. B. Bahnlinie unter Betrieb
.. beim <i>Empfänger</i> : 9. viele Quellen bzw. weite Ausdehnung der Quelle (Linienquelle) und ein Empfänger 10. Empfänger eindeutig definiert 11. Empfängerneubauten

Tabelle 4: Erste Entscheidungshilfe, wo Massnahmen wirkungsvoll oder kosteneffizient sind

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

Bauliche Massnahmen auf dem Übertragungsweg

Massnahmen auf dem Übertragungsweg sind beschränkt. Es kann gezeigt werden, 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 Schlitzten, die entweder offen bleiben oder ausbetoniert werden, zu unterbrechen (Bild 3).

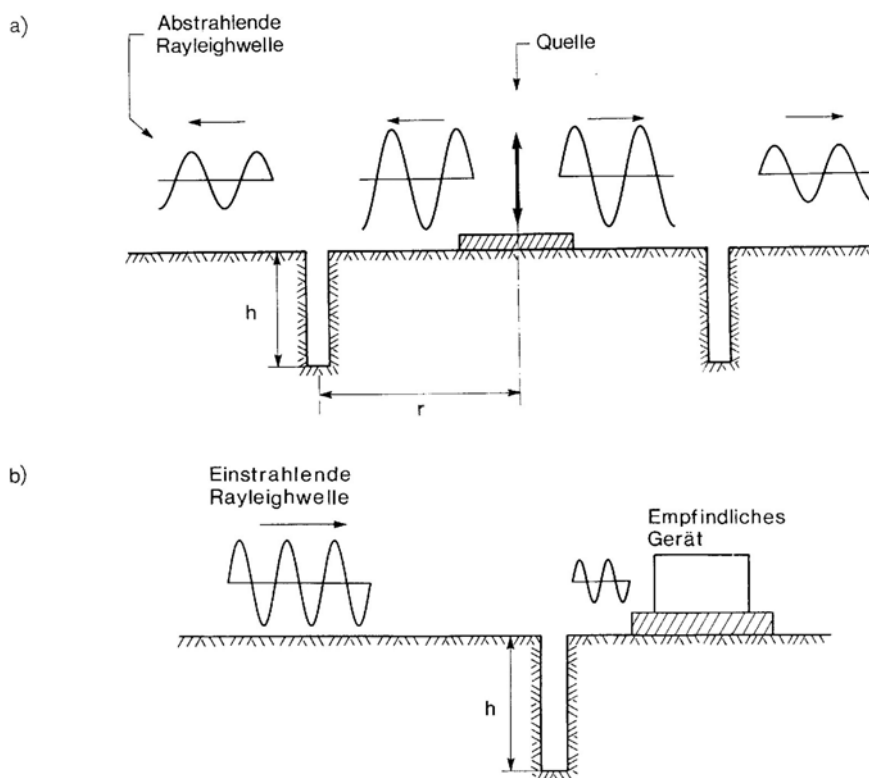


Bild 3: a) Aktive Isolation der Quelle, b) Isolation eines empfindlichen Empfängers

Solche Schlitzte werden in der Praxis mit wechselndem Erfolg eingesetzt. Die Wirksamkeit von Schlitzten verschiedener Art wurde sowohl experimentell wie auch rechnerisch eingehend untersucht. Resultate einer solchen experimentellen Untersuchung zeigt Bild 4.

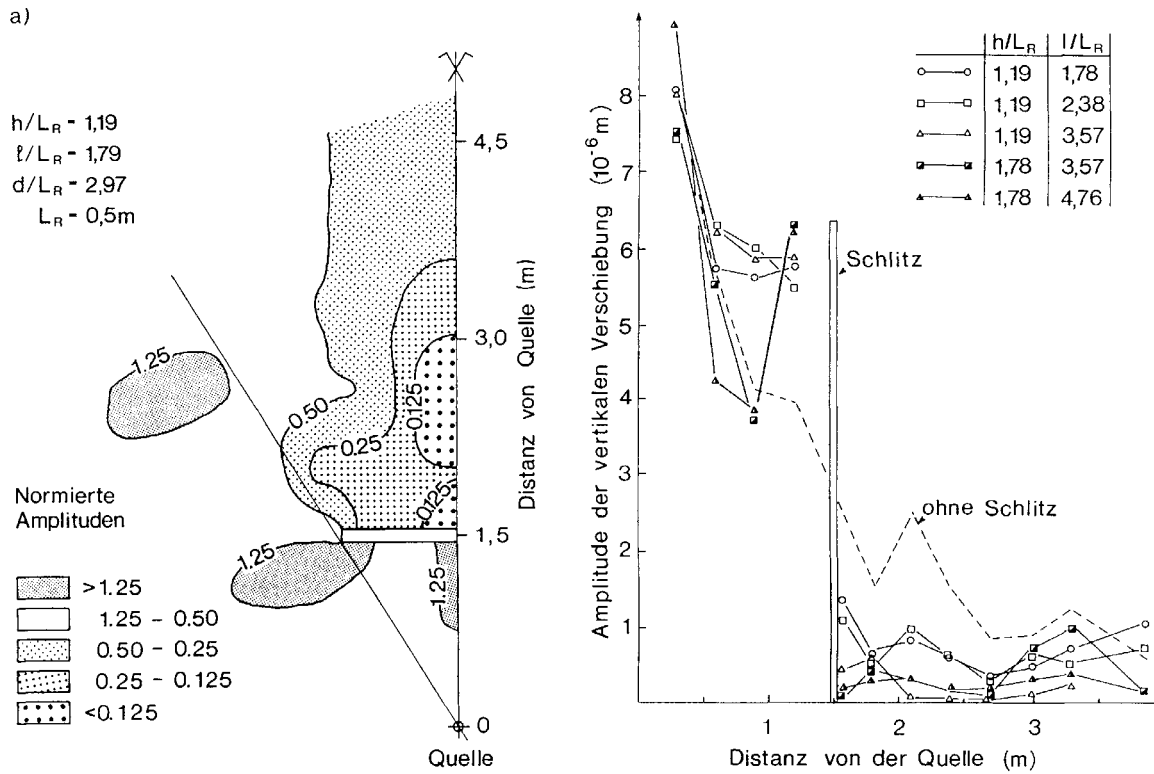


Bild 4: Abschirmwirkung von offenen Schlitzten; a) Normierte Amplituden, h = Schlitztiefe, l = Schlitzlänge, d = Distanz von der Quelle, L_R = Rayleighwellenlänge; b) Vertikale Verschiebungsamplituden in Abhängigkeit der Entfernung (nach Woods, 1968)

In Bild 4 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 4b deutlich.

Eine Zusammenfassung von experimentellen und rechnerischen Untersuchungen über die Abschirmwirkung von Schlitz und Bohrlochreihen zeigt Bild 5. Da mit Schlitz 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.

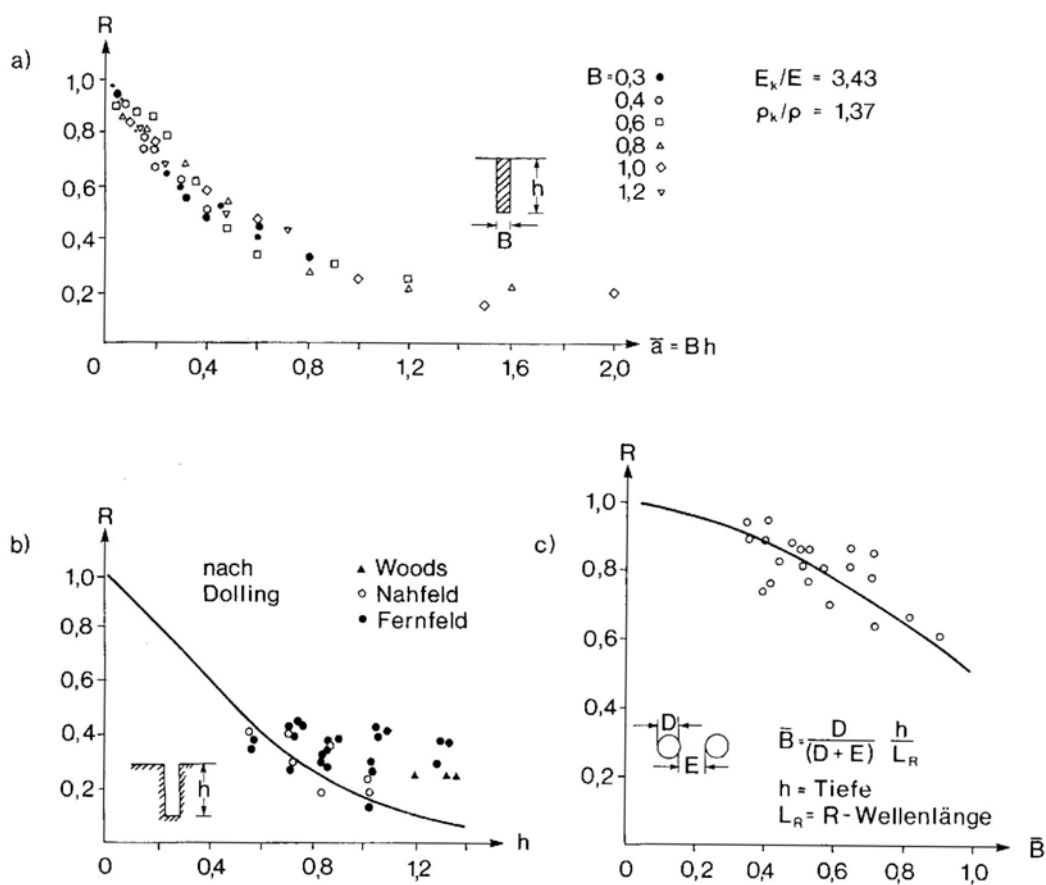


Bild 5: Abschirmung von Schlitz; a) Mit Beton gefüllter Schlitz, E_k/E = Verhältnis des E-Moduls vom Schlitz zum umgebenden Boden, ρ_k/ρ = Verhältnis der Dichten; b) offener Schlitz; c) Bohrlochreihe (Haupt 1981)

Die Abschirmwirkung eines mit Beton gefüllten Schlitzes ist in Bild 5 a dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Abschirmwirkung von einem normierten Querschnitt $a = Bh$ abhängt.

Die Abhängigkeit der Abschirmwirkung eines offenen Schlitzes zeigt Bild 5b. Dargestellt ist 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.

Die Abschirmwirkung einer Reihe von Bohrlöchern zeigt Bild 5c. Der Reduktionsfaktor ist in Abhängigkeit einer normierten Abschirmfläche 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 Schlitz sind wirksamer als gefüllte und unterbrochene Schlitz.
- 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. Schlitz 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.
- Die Wirksamkeit namentlich offener Schlitz muss auch über längere Zeit sichergestellt bleiben. Dies versucht man z.B. mit Hilfe gasgefüllter Geo-Membranen zu gewährleisten. Deren Langzeitverhalten ist heute jedoch noch nicht gut genug gesichert.
- In geschichtetem Boden ist die Wirksamkeit von Schlitz schwierig vorherzusagen.

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

Massnahmen beim Empfänger

Als Massnahmen beim Empfänger kommen im wesentlichen die folgenden Möglichkeiten in Frage:

- Änderung der Auflagerverhältnisse,
- Anbringen eines Schwingungstilgers.

Eine Änderung der Auflageverhältnisse 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 klassischen Methoden der Schwingungslehre berechnet werden.

Schwingungstilger sind bisher in der Praxis nur 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).

Referenzen

- Studer J.A., M.G. Koller, (1997). "Bodendynamik; Grundlagen, Kennziffern, Probleme", 2. Auflage, Springer Verlag.
- Studer J.A., A. Süssstrunk (1981). "Bases for Swiss Guidelines to Prevent Building damages from Vibrations", Proceedings X. International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm.
- SN 640 312 a (1992). "Erschütterungseinwirkung auf Bauwerke", Schweizerische Normenvereinigung SNV, Zürich.
- Woods R.D. (1968). "Screening of Surface Waves in Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, No. SM4, pp 951-979.
- Dolling H.J. (1970). "Abschirmung der Erschütterungen durch Bodenschlitze", Die Bautechnik, Heft 4/5.
- Haupt W.A. (1981). "Model Tests on Screening of Surface Waves", Proceedings X. International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm.
- Bachmann H., W. Ammann (1987). "Schwingungsprobleme bei Bauwerken", Structural Engineering Documents, IABSE-AIPC-IVBH, Zürich.
- Richart, F.E. Jr, J.R. Hall, R.D. Woods, (1970). "Vibrations of Soils and Foundations", Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey.