

Literatur

- [1] Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen, H. Reiher & F. J. Meister, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Band 2, S. 381–386 (1931).
- [2] Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines, H. Bachmann et al., 2. Aufl., Basel: Birkhäuser Verlag, 1997.
- [3] DIN 4150-2, Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Ausgabe 1999-06 (zzt. in Überarbeitung).
- [4] ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations.
- [5] Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS), Bundesamt für Umwelt, 20. Dezember 1999.
- [6] VSS 40 312:2019 (Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute) Erschütterungen: Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke.
- [7] Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment, Colin G. Gordon, SPIE Proceedings, vol. 1619, 1991.

Weitere Informationen

Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (SGEB): www.sgeb.ch
Bundesamt für Umwelt: www.bafu.admin.ch

Impressum

Der Einfachheit halber wird im Text nur die männliche Bezeichnung der Beteiligten verwendet. Es sind jedoch immer beide Geschlechter gemeint.

Herausgeber | Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen (www.baudyn.ch).

Redaktion | Dr. Daniel Gsell, Prof. Dr. Hugo Bachmann

Bilder | Dr. Martin Deuring, Winterthur (1), Marc Weiler, Rapperswil (2, 3), Heidi Hostettler, ETH Zürich. Departement Physik (6)

Titelbild | Schlanker, schwingender Kirchturm, Hochtenn VS

SCHWINGUNGS- UND ERSCHÜTTERUNGSPROBLEME BEI BAUWERKEN

WORAUF ES ANKOMMT UND WARUM



Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen
Fondation pour la Dynamique des Structures et la Génie Parasismique
Fondazione per la Dinamica Strutturale e l'Ingegneria Sismica

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

WARUM SCHWINGUNGS- UND ERSCHÜTTERUNGSPROBLEME BEI BAUWERKEN?

Bauwerke werden meist als ruhende, starre Strukturen wahrgenommen. In der Realität sind jedoch bei den meisten Bauwerken mechanische Schwingungen feststellbar.

Bauwerksschwingungen sind zeitlich veränderliche Bewegungen eines Bauwerks. Typischerweise handelt es sich um periodische Bewegungen um eine Ruhelage des Bauwerks.

Erschütterungen sind mechanische Schwingungen mit potenziell schädigender oder belästigender Wirkung. Sie sind meist das Resultat impulsartiger Ereignisse in einem breiten Frequenzbereich.

Dieses Falblatt richtet sich vor allem an Bauherren bzw. Auftraggeber eines Bauprojekts sowie an Architekten, Bauingenieure und Fachplaner. Das Falblatt thematisiert – nicht abschliessend – eine Grosszahl der Schwingungs- und Erschütterungsprobleme in Bauwerken.

Von Schwingungs- oder Erschütterungsproblemen wird dann gesprochen, wenn die Nutzung eines Bauwerks beeinträchtigt wird. Stärkere Schwingungen oder Erschütterungen können zudem ein Bauteil oder das ganze Bauwerk gefährden.

Schwingungs- und Erschütterungsprobleme treten eher selten auf, weshalb Bauherren und Planer diese oft erst spät in der Planungsphase oder aber erst im ausgeführten Bauwerk erkennen.



Bild 1 | Seilbrücke im Technorama in Winterthur. Eine Brücke, die gebaut wurde, um Schwingungen zu erleben.

WAS SIND TYPISCHE URSACHEN VON SCHWINGUNGEN UND ERSCHÜTTERUNGEN? WELCHE BAUWERKE SIND BETROFFEN?

Personeninduzierte Schwingungen und Erschütterungen

Gehende, laufende, rennende und hüpfende Personen geben Kräfte mit nahezu konstanten Frequenzen auf das Bauwerk ab. Trifft eine dieser Frequenzen eine Eigenfrequenz des Bauwerks, so können auch vermeintlich starre Bauteile in Resonanzschwingungen mit erheblichen Amplituden versetzt werden. Unter anderem werden so leichte, weitgespannte Geschossdecken oder Fussgängerbrücken in Schwingung versetzt.

Beim Auftritt eines einzelnen Fusses einer Person auf eine Decke entstehen impulsartige Erschütterungen. Bei leichten Decken in Holz-, Holzbetonverbund-, Stahl- oder Stahlbetonverbundbauweise können diese impulsartigen Erschütterungen als störend wahrgenommen werden.



Bild 2 | Zu Musik synchronisiert hüpfende Personen

Die Schwingungen und Erschütterungen können für andere Personen, die sich gleichzeitig auf diesen Deckenfeldern bzw. Fussgängerbrücken befinden, störend werden.

Besonders heikel sind personeninduzierte Schwingungen und Erschütterungen, wenn sich eine Gruppe von Personen synchronisiert bewegt, z.B. zu rhythmischer Musik. Dies ist insbesondere bei Turnhallen, Fitnesszentren und Konzertsälen zu beachten. Zu berücksichtigen sind zudem die sehr hohen, quasi statischen Kräfte, die solche Personengruppen auf den Boden bzw. die Decke abgeben.

Verkehrsinduzierte Erschütterungen

Eisenbahnen erzeugen Emissionen, die in den Baugrund eingeleitet werden und sich darin ausbreiten. Liegt ein Gebäude in der Nähe einer Eisenbahnlinie (i.d.R. näher als 30–50 m) oder über einem Eisenbahntunnel, so werden diese Emissionen in die Gebäudestruktur übertragen. Sie können auf den Decken zu spürbaren Erschütterungen und in den Räumen zu Körperschall führen, der als Luftschall hörbar ist.



Bild 3 | Zugdurchfahrt unmittelbar vor einem Wohngebäude

Störende Erschütterungen in Gebäuden durch Strassenverkehr können auftreten, wenn schwere Fahrzeuge über Unebenheiten (Schachtdeckel, Fahrinnen, Belagsschäden, Bushaltestellen mit steifen Betonplatten) fahren. Besonders betroffen sind Gebäude mit leichten Holz- oder Hybriddecken.

Erschütterungen durch Baumaschinen

Bei Bautätigkeiten gelangen Maschinen zum Einsatz, die Schwingungs- und Erschütterungsemissionen erzeugen. Sowohl das Rammen und Einvibrieren von Spundwandbohlen, Rühlwandträgern und Pfählen als auch das Verdichten des Baugrundes (Vibrationswalzen, Rüttelstopfverdichter, Rüttelplatten usw.) führen zu Erschütterungen in der Umgebung, die für die Nachbargebäude schädigend und für die Anwohner sehr störend sein können. Bei Sprengungen und beim maschinellen Abbau von Fels sowie beim Abbruch bestehender Gebäude ist in der Umgebung ebenfalls mit starken Erschütterungen zu rechnen.

Maschineninduzierte Schwingungen

Bei Maschinen mit schnell drehenden Teilen (Drehbänke, Fräsen, Turbinen, Generatoren, Gebäudetechnikanlagen usw.) verursachen kleine Unwuchten, die praktisch immer vorhanden sind, Schwingungen und Erschütterungen, die sich in Gebäuden und auch im Baugrund ausbreiten. Dies kann in angrenzenden Räumen oder Gebäuden zu störendem abgestrahltem Körperschall führen.



Bild 4 | Baumaschine beim Entfernen von Tramschienen

Produktionsmaschinen mit stark beschleunigten Maschinenteilen (Pressen, Stanzmaschinen, Werkzeugwechsel bei Fräsen usw.) können Schwingungen und Erschütterungen erzeugen, die sich über weite Teile in Gebäuden und teilweise auch über grosse Strecken im Baugrund ausbreiten. Dies kann für Nutzungen in der Umgebung störend sein.

Wind- und wasserinduzierte Schwingungen

Von Wind oder Wasser angeströmte und umströmte Bauteile können zu Schwingungen und Erschütterungen angeregt werden. Hochhäuser und schlanke Brücken werden durch böigen Wind zu zufälligen Schwingungen angeregt, die für den Nutzer stark spürbar sein können. Bei schlanken Bauteilen und Bauwerken lösen sich vom Bauwerk – durch die Strömung bedingt – Wirbel ab, die periodische Kräfte auf das Bauwerk ausüben. Liegt die Wirbelablösefrequenz bei einer Eigenfrequenz des Bauwerks, so kann dies zu starken, störenden Resonanzschwingungen führen. Zudem sind bei speziellen Querschnittsgeometrien – bedingt durch Selbsterregung – Tragsicherheitsprobleme infolge selbst erregter Schwingungen nicht auszuschliessen.

Windkraftanlagen senden sehr tieffrequente Schwingungen aus, welche sich im Boden oder in der Luft ausbreiten und vom Menschen als störend wahrgenommen werden können. In Wasserbauten erzeugen turbulente Strömungen Erschütterungen, die sich bis zu den nahe stehenden Gebäuden fortpflanzen können. Diese Erschütterungen können in Räumen zu Körperschall führen, der als Luftschall hörbar und für den Menschen störend sein kann. In Einzelfällen sind solche Erschütterungen auch für Menschen auf den Deckenfeldern spürbar.

Erwünschte Schwingungsarmut

In Laborgebäuden, in Spitälern und in der Präzisionsfertigung im Maschinenbau können schon feinste Schwingungen und Erschütterungen Experimente und Prozesse stören. Dies gilt auch für Arbeitsplätze, bei denen höchste Konzentration erforderlich ist. Neben Umgebungserschütterungen (nahe liegende Verkehrsträger, erschütterungsintensive Prozesse auf Nachbarparzellen usw.) sind gebäudeinterne Erschütterungen, verursacht durch Gebäudetechnikanlagen, Liftanlagen, Türen usw., entsprechend zu beachten. Auch der interne Personenverkehr und Warentransport kann stören.



Bild 5 | Wärmepumpe auf Luftfedern gelagert, neben geplantem Quantenphysiklabor

Weitere bekannte Problemstellungen

Seilbahnen, Helikopterlandeplätze, Kirchtürme, Sprungtürme, Tribünen, Verbindungen von Bauteilen mit Querkraftdornen, welche sehr laute Knallgeräusche verursachen können, sind weitere Objekte mit potenziellen Schwingungs- und Erschütterungsproblemen.

WIE VIEL IST ERTRAGBAR UND ZULÄSSIG?

Kein Bauwerk ist schwingungsfrei. Es stellt sich immer die Frage nach dem Mass, das erträglich oder zulässig ist.

Wie viel erträgt der Mensch?

Jeder Mensch hat sein eigenes Empfinden gegenüber Schwingungen und Erschütterungen. Neben der Lage, in der sich die Person befindet (stehen, sitzen, liegen), der Tätigkeit, die sie ausübt (laufen, arbeiten, schlafen usw.), und der Richtung der Schwingungen und Erschütterungen relativ zur Körperachse haben die Umgebung, der Bezug zur Erschütterungsquelle, die physische und psychische Verfassung, in der sich die Person befindet, einen entscheidenden Einfluss auf die Wahrnehmung. Diese Komplexität macht es nahezu unmöglich, einfache, allgemeingültige Kriterien für die Empfindlichkeit des Menschen aufzustellen.

Hannes Reiher und Franz Josef Meister [1] haben dazu erste systematische Untersuchungen mit einer grösseren Anzahl Personen gemacht und 1931 publiziert. Dabei wurden Klassen von Erschütterungsempfindlichkeiten definiert, denen Werte von Schwingungsamplituden zugeordnet wurden. Hugo Bachmann und Fachkollegen [2] haben diese Ergebnisse komprimiert und für den praktischen Gebrauch anschaulich dargestellt.

BESCHREIBUNG	FREQUENZ 1 BIS 10 Hz a_{max} [m/s ²]	FREQUENZ 10 BIS 100 Hz v_{max} [mm/s]
Knapp spürbar	0.034	0.5
Deutlich spürbar	0.1	1.3
Störend	0.55	6.8
Nicht ertragbar	1.8	13.8

Vertikale harmonische Schwingung auf stehende Person wirkt. Akzeptierte Mittelwerte; Streuungen bis zu einem Faktor 2 möglich [2].

Weitere Anhaltswerte können in den Normen DIN 4150-2 [3] und ISO 10137 [4] gefunden werden. Beim Eisenbahnverkehr gibt die BEKS (Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen [5]) Richtwerte vor, die als minimaler Schutz zu verstehen sind.

Neben den direkt spürbaren Auswirkungen sind immer wieder auch sekundäre Effekte infolge von Schwingungen und Erschütterungen zu beobachten, durch die sich Menschen gestört fühlen können. Dazu gehören wackelnde Bildschirme, schwingende Pflanzen, klirrende Gläser, Fensterscheiben, in denen reflektiertes Licht wackelt, usw.

Solange keine extremen physischen Kräfte auf den Menschen wirken, haben Erschütterungen keine unmittelbaren Gesundheitsfolgen. Vielmehr stehen aufgrund der Stresswirkung mögliche langfristige Auswirkungen wie Herzkreislaufstörungen und die Beeinträchtigung der mentalen Gesundheit im Vordergrund.

Wie viel erträgt ein Bauwerk?

Ob ein Bauwerk durch Schwingungen und Erschütterungen Schaden nimmt, hängt von der Amplitude, der Frequenz und der Dauer der Einwirkung sowie von der Tragstruktur ab. Die Norm VSS 40 312 [6] gibt Richtwerte für zulässige Erschütterungen vor, bei welchen das Eintreten von strukturellen Schäden unwahrscheinlich ist. Schwingungen und Erschütterungen können auch Setzungen in Böden bewirken. Setzungsdifferenzen innerhalb eines Gebäudes können zu Schäden führen. Die Richtwerte der VSS 40 312 [6] decken diese Setzungsproblematik nicht ab.

Wie viel ertragen empfindliche Geräte?

Hochauflösende Mikroskope, Mikrowaagen, Anlagen für bildgebende Verfahren, Teilchenbeschleuniger, Quantencomputer, hochpräzise Schleifmaschinen und weitere Anlagen können äusserst empfindlich auf Erschütterungen von aussen reagieren. Da alle diese Geräte eigene spezielle Aufbauten haben und somit alle unterschiedlich auf externe Erschütterungen reagieren, sind allgemeine Beurteilungskriterien oft unzureichend. Es sind gerätespezifische Anforderungen notwendig, um die Anfälligkeit auf Erschütterungen zu beurteilen. Entscheidend sind neben der Amplitude die Richtung, die massgebenden Frequenzen sowie die Einwirkungsdauer und die zeitliche Veränderung der Erschütterung (kontinuierlich oder impulsartig).



Bild 6 | Hochempfindlicher optischer Aufbau zur Laserkühlung von atomaren Gasen in der Quantenoptik-Gruppe der ETH Zürich

In den frühen 1990er-Jahren hat Colin G. Gordon mittlerweile international anerkannte Kriterien für die Beurteilung der Schwingungsarmut von Laborstandorten publiziert [7]. Die Kriterien müssen differenziert betrachtet werden. Die effektive Beurteilung und die Auswertemethodik ist daher mit dem Nutzer zu vereinbaren bzw. mit dem Hersteller der empfindlichen Anlagen abzustimmen.

WIE KÖNNEN SCHWINGUNGS- UND ERSCHÜTTERUNGSPROBLEME VERMIEDEN WERDEN?

Frühzeitige Zusammenarbeit zwischen Bauherr, Architekt, Bauingenieur, Fachplaner und Nutzer



Bild 7 | Schönausteg in Bern, Personengruppe bei Schwingungsmessung

Schwingungs- und Erschütterungsprobleme können in einer frühen Planungsphase oft konzeptionell vermieden oder mit überschaubarem Aufwand kontrolliert werden. Werden die Probleme erst im erstellten Bauwerk erkannt, sind sie meist nur noch mit unverhältnismässig grossem Aufwand oder gar nicht mehr zu lösen.

Entscheidend in der Planungsphase ist es, früh zu erkennen, ob ein potenzielles Schwingungs- und Erschütterungsproblem vorliegt und somit weiterführende Abklärungen notwendig sind.

Die einzuhaltenden Anforderungen sind in frühzeitiger und enger Zusammenarbeit zwischen Bauherr, Architekt, Bauingenieur, Fachplaner und Nutzer zu diskutieren und in der Nutzungsvereinbarung festzuhalten. Neben der zulässigen Stärke der Schwingungen und der Erschütterungen ist es meistens auch zielführend, anstelle von ganzen Geschossflächen, Bereiche im Gebäude zu definieren, in welchen diese Anforderungen zu erfüllen sind. Zu hohe, flächendeckend geltende Anforderungen können die Kosten eines Bauvorhabens unnötig stark erhöhen.

In der Planungsphase sind die zu erwartenden Schwingungs- und Erschütterungsamplituden für bestimmte, relevante Quellen zu prognostizieren und zu beurteilen. In der Regel sind stark vereinfachte, jedoch physikalisch verständliche und nachvollziehbare Simulationsmodelle für die Prognose besser geeignet als hochkomplexe Modelle, die jedes Detail abbilden und eine Scheingenauigkeit vortäuschen.

Mögliche Ansätze zur erfolgreichen Kontrolle von Schwingungs- und Erschütterungsproblemen

Die Ausbreitung von Schwingungen und Erschütterungen führt in der Regel zur Abnahme der Amplituden mit der Distanz. Eine **räumliche Trennung von Quelle und empfindlichem Empfänger** ist anzustreben. Idealerweise stehen Quelle und Empfänger nicht im gleichen Gebäude oder zumindest nicht auf der gleichen Geschossdecke.

Die **Bodenplatte** (Foundation eines Gebäudes) ist ein geeigneter Ort, um Erschütterungsquellen, aber auch empfindliche Geräte zu platzieren. Im Falle der Quelle kann die Schwingungs- und Erschütterungsenergie in den Baugrund abgestrahlt werden, wodurch sich im Gebäude weniger Erschütterungsenergie ausbreitet. Im Gegensatz zu einer Geschossdecke, die in ihren Feldern frei schwingen kann, behindert der Baugrund die Schwingungen und Erschütterungen der Bodenplatte. Sie ist daher auch ein idealer Ort für empfindliche Anlagen.

Bauteile mit grosser Steifigkeit und Massenträgheit sind typischerweise weniger schwingungsanfällig als schlanke leichte Strukturen. Mit einer geschickten Kombination von Steifigkeit und Masse kann die Resonanzfrequenz eines Bauteils so gewählt werden, dass diese klar über oder unter der Anregungsfrequenz der Quelle liegt, wodurch die Schwingungs- und Erschütterungsamplituden begrenzt bleiben. Dies wird als **Hoch- bzw. Tiefabstimmung des Bauteils** bezeichnet.



Bild 8 | Elastische Lagerung einer Betonstruktur mit Federpaketen

Die **elastische Entkopplung** einer Erschütterungsquelle und/oder eines empfindlichen Empfängers von der Aufstellfläche ist ein sehr effizienter und einfacher Ansatz zur Kontrolle der Schwingungs- und Erschütterungsamplituden. Dabei wird die **Anlage auf Stahlfedern oder Gummielemente** gestellt. Die Steifigkeit der Elemente ist

sorgfältig auf die Masse der Anlage und auch auf die Frequenzen der störenden Schwingungen und Erschütterungen auszuwählen. Mit zusätzlicher gelagerter Masse kann die Bewegung der elastisch gelagerten Anlage begrenzt werden. Anstelle von Federelementen können auch **aktive Elemente** eingesetzt werden, welche die Schwingungen und Erschütterungen kompensieren. Dies ist im Laborbau (z.B. für die Lagerung hochempfindlicher Mikroskope) heute Standard.

Bei quasi eindimensionalen Bauwerken wie Fussgängerbrücken, Hochhäusern und Sprungtürmen werden zur Begrenzung der Schwingungen **Schwingungstilger** eingesetzt. Ein Schwingungstilger besteht prinzipiell aus einer Masse (wenige Prozente der Bauwerksmasse) sowie einer Feder und einem Dämpfer. Die Feder wird so gewählt, dass zusammen mit der Masse eine Eigenfrequenz resultiert, die nahe bei der Eigenfrequenz des Bauwerks liegt. Ein Schwingungstilger ist in einem relativ engen Frequenzband ein sehr effizientes, einfaches mechanisches System, um Bauwerksschwingungen zu reduzieren. Eine falsche Auslegung kann jedoch zu einer kontraproduktiven Wirkung führen. Schlanke Fussgängerbrücken werden oft so konstruiert, dass erst aufgrund von Messungen am ausgeführten Bauwerk entschieden wird, ob Schwingungstilger eingebaut werden sollen. Dazu ist es notwendig, dass Befestigungspunkte für die Dämpfer vorhanden sind.

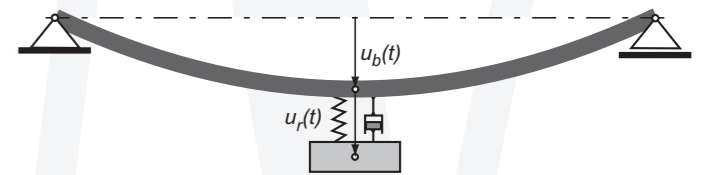


Bild 9 | Schematische Darstellung eines Schwingungstilgers

In unmittelbarer Nähe einer Baustelle empfiehlt sich oft eine Bauwerksüberwachung mittels Erschütterungsmessgeräten zur Schadensprävention. Liegen die Erschütterungen im Bereich von Grenzwerten, so können die erschütterungsintensiven Arbeiten gestoppt bzw. angepasst werden.

Die oben genannten Massnahmen sind alle begrenzt in ihrer Wirkung. Bei der Planung eines Bauwerks kann nicht darauf vertraut werden, dass es immer eine Lösung zur ausreichenden Reduktion sämtlicher Schwingungen und Erschütterungen gibt. Daher ist die **frühzeitige Zusammenarbeit zwischen Bauherr, Architekt, Bauingenieur, Fachplaner und Nutzer entscheidend**. Die möglichen Lösungsansätze zur Reduktion sind in der Planungsphase detailliert zu untersuchen, und es ist zu verifizieren, dass eine ausreichende Reduktion der Schwingungen und Erschütterungen möglich ist.