

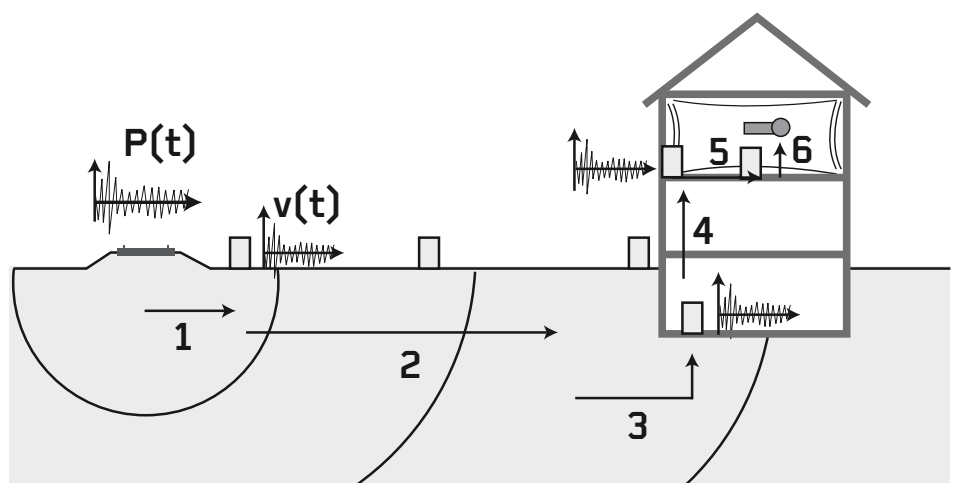
ERSCHÜTTERUNGSQUELLE SCHIENENVERKEHR



01

Schienenverkehrsanlagen verursachen Erschütterungs- und Körperschallimmissionen, die sich auf umliegende Gebäude übertragen. Auf Messdaten gestützte Ausbreitungsmodelle helfen geeignete Massnahmen zum Schutz von Bauwerken und Bewohnern gezielt zu planen und auszuführen.

Der Umweltbereich Erschütterungen und Körperschall hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Als Folge der dichten Bauweise, insbesondere in den Ballungszentren, entstehen Nutzungskonflikte: Der schienengebundene Verkehr durchquert dichtbesiedelte Gebiete mit häufig geringem Abstand zu den angrenzenden Überbauungen. Das Abschirmen des Luftschalls (z. B. Schallschutzwände neben den Bahntrassen) und passive Schallschutzmassnahmen lassen die Erschütterungen sowie den abgestrahlten Körperschall dominanter erscheinen. Die über das Oberbausystem, den umgebenden Boden und die Gebäudestruktur übertragenen Schwingungen führen normalerweise nicht zu Schäden an der Bausubstanz. Fühl- und hörbare Erschütterungen in Schwingung versetzter Gebäudeteile können jedoch zu einer Beeinträchtigung des Wohlbefindens der Bewohner führen. Im Gegensatz zum Luftschall gibt es hier bis heute noch keine verbindlichen Verordnungen. Die Beurteilung erfolgt heute anhand einer Weisung; eine eidgenössische Verordnung wird erarbeitet. Bei vielen Erschütterungs- und Körperschallproblemen entlang von schienengebundenen Verkehrsträgern ist die Durchführung von Messungen zwingend erforderlich, da die rein mathematische Immissionsabschätzung zu



02

01 Schienenverkehrsanlagen verursachen Körperschallimmissionen, die auf die umliegenden Gebäude übertragen werden. Dadurch kann das Wohlbefinden der Bewohner beeinträchtigt werden (Bild: Fleischer)

02 Vereinfachte Modellvorstellung der Erschütterungsausbreitung (Quelle: Ziegler, Zürich)

Abschnitt	Ausbreitungsphänomen	Einflussparameter
1 Schiene – Trasse	Umsetzung der Belastung in eine Erschütterung	Schientyp, Unterbau, Baugrund
2 Trasse – Freifeld	Ausbreitung einer begrenzten linienförmigen Erschütterung im geschichteten Halbraum	Gleislage (offene Strecke, Tunnel, Damm, Einschnitt), Baugrund, Distanz
3 Freifeld – Fundament	Ankopplung der Freifeldschwingung an das Gebäude	Baugrund, Gebäudemasse, Kontaktfläche, Gebäudesteifigkeit
4 Fundament – Aussenmauer	Schwingungsanregung der Aussenmauern	Masse der Stockwerke, Steifigkeit der vertikalen Tragelemente
5 Aussenmauer – Geschossdecke	Schwingungsanregung der Geschossdecke	Deckensteifigkeit, Deckeneigenfrequenz, Massenverteilung, Dämpfung
6 Geschossdecke – Körperschall	Abstrahlung der Vibrationen als Luftschall, Reflexion und Absorption von Luftschall	Decken- und Wandabmessungen, Oberflächenbeschaffenheit, Abstrahleffizienz, Absorption

03 Die Erschütterungsausbreitung lässt sich in sechs Abschnitte unterteilen (Quelle: Ziegler, Zürich)

grosse Unsicherheiten beinhaltet. Auf Messdaten abgestützte, so genannte semi-empirische Ausbreitungsmodelle hingegen haben sich in der Praxis bestens bewährt, da wesentliche Übertragungsspektren extrahiert und ins Modell eingeführt werden können. Bei Richtwertüberschreitungen, meist in Verbindung mit hohen Komfortansprüchen, stellt sich die Frage nach möglichen Verbesserungs- und Sanierungsmassnahmen. Hier hat sich die Technik stark entwickelt; quell-, ausbreitungs- und empfängerseitige Massnahmen können heute gezielt geplant und ausgeführt werden.

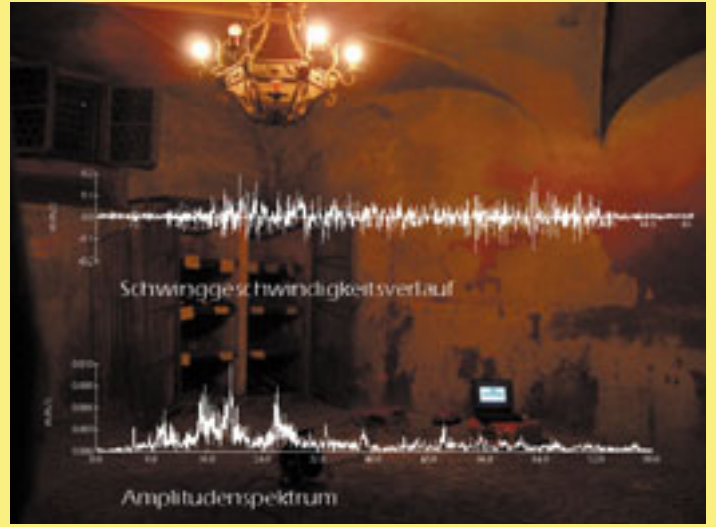
ERSCHÜTTERUNGS-AUSBREITUNG

Als Erschütterungen werden mechanische Schwingungen, die auf Menschen, Anlagen, Geräte, Bauwerke oder Baugrund wirken, bezeichnet. Schwingungsenergie wird in Form von Wellen durch den Untergrund geleitet, an geologischen Schichtgrenzen und teilweise am Grundwasserspiegel reflektiert und kann schwingungsanfällige Systeme zu Vibrationen anregen. Die rechnerische Erfassung der Erschütterungsausbreitung ist komplex; in der Praxis hat sich für die Analyse von Erschütterungsproblemen die vereinfachte Modellvorstellung bewährt (Bild 2). Dieses Modell unterscheidet drei Bereiche: Quelle (Emission), Übertragungsmedium (Transmission) und Empfänger (Immission). Die Ausbreitung wiederum lässt sich in sechs Abschnitte unterteilen (Tabelle 3).

Infolge unterschiedlicher Anregungsmechanismen am System Fahrzeug/Schiene entstehen dynamische Kräfte, die über den Gleisoberbau als Erschütterungsenergie in den Untergrund abgegeben werden. Die als Emission verursachten Erschütterungen werden über den Boden auf ein nahe liegendes Gebäudefundament und von hier über die Mauern auf die Wohnräume bzw. deren Geschossdecken übertragen. Auf dem Weg vom Geleise zum Gebäudefundament schwächen sich die Erschütterungen infolge Ausbreitungs- und Materialdämpfung ab, und beim Übergang vom Boden auf das Fundament erfahren die Erschütterungen eine weitere Reduktion als Folge des so genannten Ankoppelungseffekts. Die Erschütterungen des Gebäudefundamentes erreichen dann praktisch unverändert die oberen Stockwerke, können aber durch das Eigenschwingungsverhalten der Geschossdecken und Wände mehr oder weniger verstärkt werden.



04



05

Durch die Vibrationen von Fussboden und Decke, und zu einem geringeren Teil auch durch die Vibrationen der Wände, wird in einem Raum hörbarer Schall verursacht, der so genannte abgestrahlte Körperschall. Der Zusammenhang zwischen Erschütterungsamplitude und abgestrahltem Körperschall kann mit verschiedenen Gleichungen gezeigt werden, die Umrechnung ist jedoch von vielen Parametern abhängig und somit grossen Variationen unterworfen.

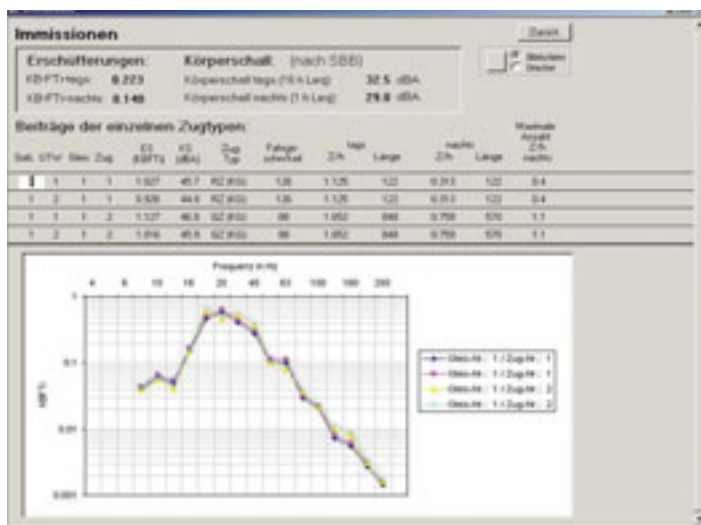
MESSUNGEN

Ein objektspezifisches, vernetztes Aufstellen hochpräziser Messgeräte und simultanes Messen der massgebenden Immissionsgrössen ermöglichen Rückschlüsse auf gesuchte Untersuchungsparameter. Um Erschütterungs- und Körperschallimmissionen entlang bestehender Bahnlinien vollständig und sachgerecht erfassen zu können, wird eine Messanordnung entsprechend der vereinfachten Modellvorstellung der Erschütterungsausbreitung empfohlen. Eine Messkampagne soll neben den reinen Beurteilungswerten auch Daten über die Erschütterungsausbreitung für den betrachteten Sachverhalt liefern. Die daraus abgeleiteten Transferfunktionen bilden die Grundlage für Prognoseberechnungen und können bei vergleichbarer Problemstellung für erste Grobbeurteilungen herangezogen werden. Üblicherweise werden für die Auswertung und spätere Beurteilung lediglich die Zeitverläufe der direkten «Vorbeifahrten» gemessen; das zeitgleiche (und allenfalls sogar über einen längeren Zeitraum dauernde) Aufzeichnen der Maximalamplituden in Form einer Dauerüberwachung ermöglicht jedoch auch Rückschlüsse über weitere, nicht schienengebundene Erschütterungsimmissionen und die sich ändernden Randbedingungen (z. B. Änderung der Lage des Grundwasserspiegels). Das In-Relation-Setzen von durchgeführten Einzelmessungen, sei dies durch rein theoretische Überlegungen oder durch Dauermessungen, gehört zu einer kompletten Messkampagne; die Genauigkeit und damit die Aussagekraft der ermittelten Beurteilungswerte wird dadurch wesentlich erhöht.

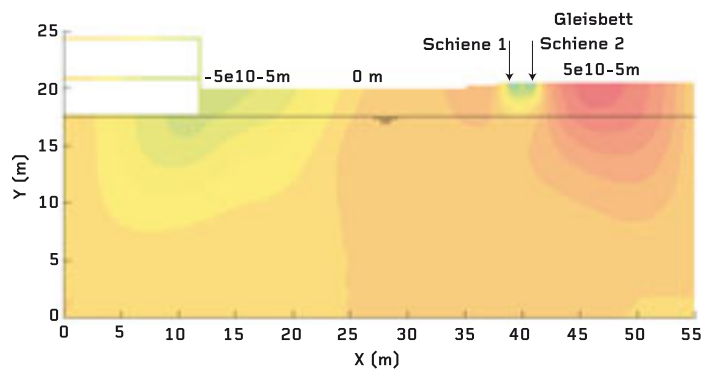
Die Erschütterungsmessungen erfolgen üblicherweise je Messort dreikanalig, mittels triaxialen Geschwindigkeitssensoren (mm/s), simultan zu den Körperschallmessungen in der Raummitte der, wenn möglich, bahnabgewandten Räume (Bild 4). Eine mobile Ausstattung der Auswer-

04 Darstellung eines Schwinggeschwindigkeitsverlaufs und eines Amplitudenspektrums eines vorbeifahrenden Zuges

05 Typische Messaufstellung zur Messung der Erschütterung und des abgestrahlten Körperschalls (Bilder: Fleischer)



06



07

tungscomputer ermöglicht erste Auswertungen vor Ort. Da für die Immissionsberechnungen Emissionsspektren benötigt werden, werden anschliessend sämtliche massgebenden, d.h. für den jeweiligen Messort ungünstigsten Vorbeifahrten in Schichten eingeteilt (Unterscheidung der Zugtypen sowie der befahrenen Geleise), frequenzanalysiert und gemittelt.

Es ist nicht möglich, den als Folge einer sehr nahen Zugvorbeifahrt in einem Raum hörbaren Schall auf Antrieb in einen Anteil direkt einfallenden Luftschall und in einen Anteil indirekt übertragenen Körperschall aufzuteilen. Dazu sind spezielle Messungen bzw. Untersuchungen notwendig. Beim vereinfachten Vorgehen erfolgt die Unterscheidung zwischen direkt einfallendem Aussenlärm und indirekt übertragenem abgestrahltem Körperschall dadurch, dass aus dem gesamten im Rauminnen gemessenen Schallpegel die für den Körperschall hauptsächlich verantwortlichen Terzbänder mit Hilfe von Frequenzanalysen herausgefiltert und separat als Summenpegel extrahiert werden. Beim exakten Vorgehen wird sichergestellt, dass diese Lärmanteile nicht durch reine Aussenlärmübertragungen verursacht werden. Das Differenzspektrum «Aussenschall» minus «Innenschall» einer Zugvorbeifahrt wird mit dem aus reinem Lautsprecherausstrahlung verglichen. Allfällige «Einbrüche» in den Schalldämmeigenschaften der Fassade (insbesondere Fenster) werden entsprechend berücksichtigt, d.h. nicht als Körperschallanteile interpretiert.

ANALYSEN UND PROGNOSEN

Die Analyse bzw. die Prognostizierung der Erschütterungs- und Körperschallimmissionen erfolgt heute weitgehend über computerunterstützte Emissions- und Ausbreitungsmodelle. Die verschiedenen Modelle lassen sich in folgende Gruppen unterteilen: einfache Abminderungsmodelle, frequenzabhängige Ausbreitungsmodelle sowie Finite-Elemente-Modelle. Das dabei oft angewandte semi-empirische Vorgehen über Referenzmessungen und Kalibrieren der Rechenmodelle ermöglicht bei relativ geringem Aufwand verlässliche Aussagen über Auswirkungen von Um- und Ausbauten und von angeordneten Erschütterungsmassnahmen.

06 Computergestützte Immissionsberechnungen; Ausschnitt aus der Software VIBRA-2 (Bild: Fleischer)
 07 Parameterstudien Erschütterungsausbreitung, numerische Modellierung (Quelle: GeoNum, Zürich)

Gängige und anerkannte Standardsoftware für die Berechnung von Zugimmissionen berechnet die Immissionen mit frequenzabhängigen Ansätzen. Alle wichtigen Aspekte der Erschütterungsausbreitung werden dabei berücksichtigt und können vom Benutzer kontrolliert und beeinflusst werden.

Dies bedingt, dass der Benutzer vertiefte Kenntnisse über die Erschütterungsausbreitung besitzt. Anstelle der Beschreibung der Schwingungsstärke mit einer einzigen Zahl, wie z. B. die maximale Schwinggeschwindigkeit, wird bei den frequenzabhängigen Abminderungsmodellen die Spektraldarstellung verwendet; die Schwingung wird als Funktion der Frequenz erfasst. Die Ausgangsgrösse ist nicht mehr eine Anregungsamplitude, sondern ein Anregungsspektrum, und an die Stelle der Abminderungsfunktion treten Transferfunktionen oder Transferspektren. Dabei ist es unerheblich, ob Transferfunktionen, die eine kontinuierliche Darstellung der Schwingung im Frequenzbereich erlauben, verwendet werden oder Transfer-Terzbandspektren mit einer diskontinuierlichen Darstellung im Frequenzbereich (Bild 6).

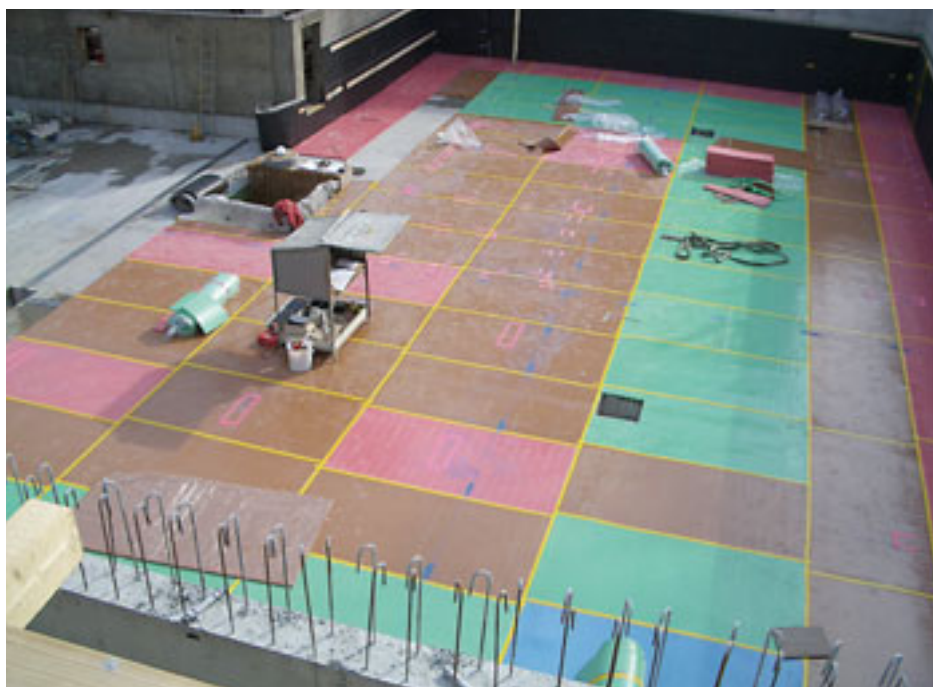
Gemeinsam für beide Beurteilungskriterien ist die Einteilung der Zugdurchfahrten in Schichten: Zusammengefasst werden die verschiedenen Zugkategorien pro Gleis. Diese Schichten werden anschliessend über die Zugzahlen auf die zu bestimmenden Zustände umgerechnet. Die Prognosen der Erschütterungen kommen der Wirklichkeit sehr nahe, die Grösse des abgestrahlten Körperschalls ist hingegen mit grösseren Unsicherheiten behaftet. Der rein aufgrund der Deckenschwingung errechnete abgestrahlte Körperschall ist zwar der geforderte statistisch wahrscheinlichste Wert, die gemessenen Werte unterliegen aber einer grossen Streuung ($> \pm 5 \text{ dB(A)}$, abhängig u. a. von Raumgeometrie, Möblierungsgrad, Oberflächenbeschaffenheit aller Oberflächen). Die Abstrahleffizienz muss mit zusätzlichen objektspezifischen Abstrahlkoeffizienten korrigiert und kann nur basierend auf Messungen verlässlich bestimmt werden. Im Allgemeinen werden bei Umweltverträglichkeitsprüfungen für die Berechnung von Grenzabständen die Quartiere in typische Überbauungszonen eingeteilt, und auch bei den Modellannahmen auf dem Ausbreitungswert werden für grössere Bereiche einheitliche Parametersätze verwendet. Hier gilt es, eventuell betroffene Gebäude zu markieren und die Verhältnismässigkeit von Massnahmen zu diskutieren.

BEURTEILUNGSWERTE

Beurteilt wird bei Erschütterungs- und Körperschallimmissionen infolge Schienenverkehrsanlagen in erster Linie die «Belästigung des Menschen». Die «gesundheitliche Gefährdung des Menschen» (siehe u. a. Wegleitung zur Verordnung 3 zum Arbeitsgesetz) sowie die «Gefährdung von Bauwerken» (gem. SN 640 312 «Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke») müssen selten genauer untersucht werden. Grenzwerte von schwingungsempfindlichen Maschinen unterscheiden sich stark und müssen spezifisch definiert werden (zulässige Schwinggeschwindigkeiten bezüglich des Frequenzbereichs).

Erste Richtwerte für Erschütterungs- und Körperschallimmissionen wurden auf der Grundlage des schweizerischen Umweltschutzgesetzes festgelegt. Verschiedene (interne) Weisungen u. a. der SBB bzw. projektspezifische Verweise auf andere Normen sowie unterschiedliche Definitionen von Richtwerten führten zu einer Rechtsunsicherheit, die 1999 mit der Herausgabe der BAV-/Buwal-(heute Bafu-)Weisung «Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS)» behoben wurde. Diese sollte bald durch die «Verordnung über den Schutz vor Erschütterungen (VSE)» abgelöst werden. Die SIA 181:2006 «Schallschutz im Hochbau» weist bereits im Zusammenhang mit abgestrahltem Körperschall auf diese künftige Verordnung hin.

Analog der Lärmschutzverordnung, die energieäquivalente Dauerschallpegel oder Mittelungspegel L_{eq} für die Beurteilung verwendet, werden auch die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen für die Hauptbeurteilung über den «Tag» und die «Nacht» gemittelt: Die Beurteilungsgrösse entspricht dem durch den gesamten Zugverkehr (Summe aller Züge und aller Kategorien) beim Immissionsort über die Beobachtungszeit erzeugten konstanten Pegelwert, der die

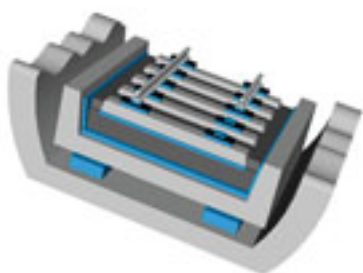


08

gleiche Energie zum Empfänger bringt wie ein in der gleichen Zeitspanne schwankender Pegel. Diese Immissionsrichtwerte gelten zonenspezifisch, und es wird zwischen verschiedenen Anforderungsstufen unterschieden.

Die Beurteilung des Einzelereignisses bzw. eine genaue Definition der Einstufungsparameter erscheint insbesondere dann von Bedeutung, wenn sich bei einem höheren Kostenniveau eines Bauvorhabens entsprechende Vermietungen und Verkäufe nur in Verbindung mit sehr hohen Komfortansprüchen realisieren lassen.

Oder, mit anderen Worten, aus Nutzersicht werden «normale» Normenanforderungen oft als ungenügend eingestuft. Beispielsweise ist die Aussage «Richtwerte eingehalten» nicht mit «nichts hör- oder fühlbar» gleichzusetzen. Die Zugdurchfahrten können, insbesondere bei sonst ruhiger Umgebung, akustisch wahrgenommen werden, obwohl die Beurteilungswerte eingehalten werden. Für die Beurteilung des abgestrahlten Körperschalls können die Werte gemäss SIA181:2006 für Geräusche haustechnischer Anlagen und fester Einrichtungen im Gebäude als Vergleichsgrösse herangezogen werden. Es empfiehlt sich jedoch, diese Werte mit dem Auftraggeber zu besprechen, mit Bezug auf den Ausbaustandard verschärft zu definieren und in Form einer Nutzungsvereinbarung festzuhalten.



09

08 Empfängerseitige Massnahme: Einbau der Trennlage zur vollflächigen elastischen Gebäudelagerung (Bild: Trombik)

09 Massnahme an der Quelle: elastische Komponenten für den Oberbau (Quelle: Getzner Werkstoffe)

SCHUTZMASSNAHMEN

Bei bestehenden oder neu zu erwartenden Richtwertüberschreitungen stellt sich meist die Frage nach möglichen Verbesserungs- und Sanierungsmassnahmen. Als weitere Massnahme, zu nachfolgend aufgeführten quell-, ausbreitungs- und empfängerseitigen Massnahmen, kann die stete Reduktion der Emissionen aus dem Bahnbetrieb bezeichnet werden: Die Verbesse-

rungen der Bahnen betreffen in erster Linie das Rollmaterial, die Ebenheit der Fahrbahn sowie die Optimierung von erschütterungsrelevanten Gleiselementen (Weiche, Schienenstösse etc.). Allen Massnahmen an der Quelle gemeinsam ist das Bestreben, durch eine zusätzliche, über die Federwirkung des üblichen Schotterbettes hinausgehende elastische Bettung des Geleiseoberbaues eine erhöhte Erschütterungsdämmung zu erreichen: z. B. Masse-Feder-Systeme, Unterschottermatten (USM) oder Schwellenbesohlungen (Schwellenlager; Bild 8). Bei der Auslegung von quellseitigen Massnahmen gilt es zu beachten, dass nicht nur eine möglichst grosse Weichheit im Hinblick auf eine bestmögliche Dämmwirkung angestrebt werden darf, sondern dass auch die Anforderungen in Bezug auf maximal zulässige Deformationen sowie Lagestabilität der Gleise zu beachten sind. Da bei oberflächennaher Schwingungsanregung etwa 67 % der Gesamtenergie in Form von Rayleigh-Wellen (Oberflächenwellen) transportiert werden, ist es nahe liegend, bei Massnahmen auf dem Übertragungsweg die Oberfläche zu unterbrechen. Dies kann z. B. durch offene, permanent elastische bzw. ausbetonierte Schlitze erfolgen. Solche Bodenschlitze haben sich jedoch in der Praxis bislang mit wechselndem Erfolg bewährt; eine Prognose der im Vergleich zu den anderen Massnahmen geringen Dämmwirkung ist zudem schwierig.

Empfängerseits kann das Gebäude durch eine elastische Lagerung wirksam gegen die Einleitung von Schwingungen geschützt werden. Je nach der geforderten Dämmwirkung sowie den konstruktiven Gegebenheiten wird die Lage der Dämmebene bestimmt. Über den Einbau von Federelementen (z. B. Stahlfedern) oder elastischen Matten (Bild 9) können Gebäude als Ganzes oder auch Gebäudetrakte, meist direkt unterhalb der Kellerdecke, erfolgreich entkoppelt werden. Massgebend für die Dimensionierung sind die Lagerbelastung (Pressung) und die geforderte Abstimmfrequenz. Dabei können je nach Belastung lokal unterschiedliche Lagertypen zur Anwendung kommen, damit die Einfederung bei konstanter Lagerdicke für alle Lager gleich bleibt.

Pascal Stefan Fleischer, dipl. Bau-Ing. MSc / ETH / HTL / SIA, Trombik Ingenieure AG, Zürich,
p.fleischer@trombik.ch

Literatur:

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal): Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS); 20. Dezember 1999.
DIN-Norm Nr. 4150 «Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden»; Juni 1999.
Deutsche Bahn: Körperschall- und Erschütterungsschutz, Leitfaden für den Planer, Stand 30.06.2000.
Ziegler Consultants, Zürich: Handbuch zum Programm VIBRA-2, 1. März 2001.
Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau: Reduktion von Erschütterungen und Körperschall beim Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen, Januar 1993.
P. Trombik: Erschütterungen und abgestrahlter Körperschall entlang unter- und oberirdischen Bahnstrecken; SIA D079, Vibrationen; Oktober 1991.