Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 110 (1992)

Heft: 48

Artikel: Körperschall von Bahn- und Strassenverkehr: neue Aufgaben in der Lärmbekämpfung

Autor: Rutishauser, Gérard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-77993

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

ASIC-Artikelreihe: Neuartige Aufgaben

Körperschall von Bahn- und Strassenverkehr

Neue Aufgaben in der Lärmbekämpfung

Der Schutz gegen Verkehrslärm hat in letzter Zeit, ausgelöst durch die Gesetzgebung zum Umweltschutz, erhebliche Bedeutung erlangt. Nebst den direkten Luftschallimmissionen können auch die von Strassen und Bahnen ausgehenden Schwingungen, welche durch den Boden und die Bauwerke übertragen werden, als niederfrequenter, abgestrahlter Körperschall in den anliegenden Häusern störend wirken. Oft zeigt sich die Störung durch Körperschall erst dann, wenn der direkte Luftschall durch bauliche Massnahmen gedämmt wird. Daher werden sich die Körperschallprobleme mit fortschreitender Lärmsanierung zunehmend manifestieren. Wie sollen solche Immissionen beurteilt und mit welchen Methoden und technischen Massnahmen können Lösungen gefunden werden.

Ermittlung und Beurteilung von Körperschall

Analyse

Wie in der Überschrift erwähnt, ist der bauliche Lärmschutz einer der Gründe, warum zunehmend Probleme in Form

VON GÉRARD RUTISHAUSER, ZÜRICH

von störenden Körperschallimmissionen auftreten. Auch eine gewisse Sensibilisierung der betroffenen Bevölkerung oder von solchen, welche befürchten, infolge eines Projektes betroffen zu werden, ist festzustellen. Weil der tieffrequente Körperschall vor allem nachts sehr störend wirkt, ist auch der stark zunehmende Nachtverkehr ein Grund für vermehrte Belästigung der Anwohner. Wie Bild 1 zeigt, ist der abgestrahlte Körperschall meistens ab etwa 40 bis 50 Hz von Bedeutung. Schwingungen mit tieferen Frequenzen werden, sofern die Fühlbarkeitsgrenze überschritten ist, als reine Erschütterungen wahrgenommen und sind kaum mehr hörbar.

Nur in wenigen bekannten Fällen ist der Strassenverkehr die Quelle des störenden Körperschalls. Die Ebenheit der Fahrbahn und die Menge des nächtlichen Schwerverkehrs sind dabei die zwei wichtigsten Parameter. Demgegenüber hat der Schienenverkehr als Körperschallquelle eine weit grössere Bedeutung.

Für die Entstehung und Ausbreitung der Schwingungen sind vielfältige Einflussfaktoren von Bedeutung, wie z.B.: Art, Gewicht und Geschwindigkeit der Fahrzeuge, Gegebenheiten der Strecke und Aufbau der Fahrbahn, topografische, geologische und hydrologische Verhältnisse, Distanz, Art und Struktur der Gebäude. Auf dem Ausbreitungsweg kommt es immerwieder zu Reflektionen, Refraktionen und zur Anregung von Resonanzschwingungen. Prognosen der zu erwartenden Emissionen und Immissionen sind dementsprechend schwierig. In der Praxis ist es mit den zur Verfügung stehenden Mitteln und Terminen meistens gar nicht möglich, die für eine einigermassen präzise Berechnung erforderlichen Kennwerte zu ermitteln.

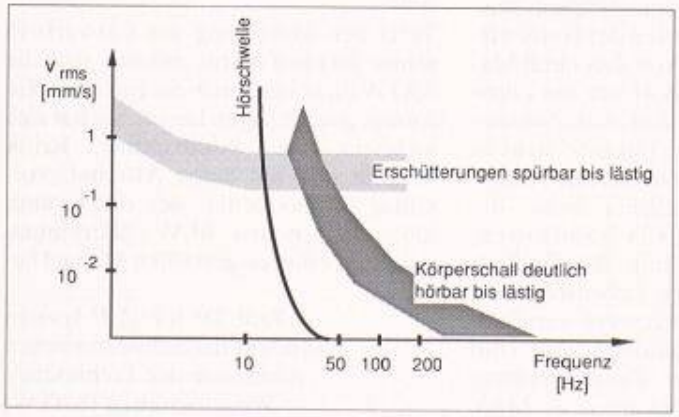


Bild 1. Massgebender Bereich für Körperschall und Erschütterungen bei durchschnittlicher Korrelation zwischen Schwingung des Raumbodens (v_{rms}) und abgestrahltem Körperschall

Es gibt derzeit kein einheitliches Vorgehen zur Durchführung einer Immissionsprognose. Die vorhandenen Möglichkeiten schwanken extrem zwischen sehr einfachen pauschalen Abschätzungen und sehr aufwendigen theoretischen Modellrechnungen. Dieser unbefriedigende Zustand ist in absehbarer Zukunft kaum zu ändern, da zu den komplizierten physikalische Ausbreitungsvorgängen auch noch vielfältige Anforderungen des Erschütterungsschutzes (technische Randbedingungen bei der Ursache und bei Massnahmen, Immissionsrichtwerte usw.) hinzukommen.

Für die Immissionsprognosen wird ein schrittweises Vorgehen vorgeschlagen:

☐ Übersichtsschätzung: Anwendbar in einfachen Fällen, bei eindeutigen Verhältnissen, für Grobanalysen.

☐ Analytisch-messtechnisches Verfahren: Anwendbar bei Ausbreitungssystemen, die in wesentlichen Teilen messtechnisch erfassbar sind.

☐ Berechnung: Untersuchung in diskretisierten Modellen mit der Finite-Elemente- oder der Randelement-Methode.

Die Art der Prognose sollte dem jeweiligen Projektstand bezüglich Qualität und Zeitablauf angepasst sein. Eine Fixierung der Berechnungsmethode in irgendwelchen Normen oder Richtlinien ist beim derzeitigen Stand der Entwicklung nicht zweckmässig, sondern würde den erforderlichen Fortschritt eher behindern.

Für Körperschallimmissionen genügt es nicht, mit einem irgendwie gewichteten Summenpegel zu operieren. Frequenzanalysen sind bei derartigen Problemen unerlässlich. Schon Bild 1 zeigt, dass je nach Frequenz der massgebenden Schwingungen entweder reine Erschütterungen, oder der abgestrahlte Körperschall, oder die Kombination beider Wahrnehmungsarten eine Rolle spielen. Zur Analyse der Körperschallquelle, der Ausbreitungsverluste mit allfälligen Resonanzeffekten wie auch zur Bemessung wirksamer Schutzmassnahmen muss der Frequenzgang der Schwingungen bekannt sein. In der Regel genügt es, für typische Ereignisse eine Frequenzanalyse durchzuführen und dann nachzuweisen, dass alle massgebenden Ereignisse, beispielsweise Lastwagenvorbeifahrten, ähnliche Spektren aufweisen oder innerhalb einer bestimmten Umhüllenden liegen.

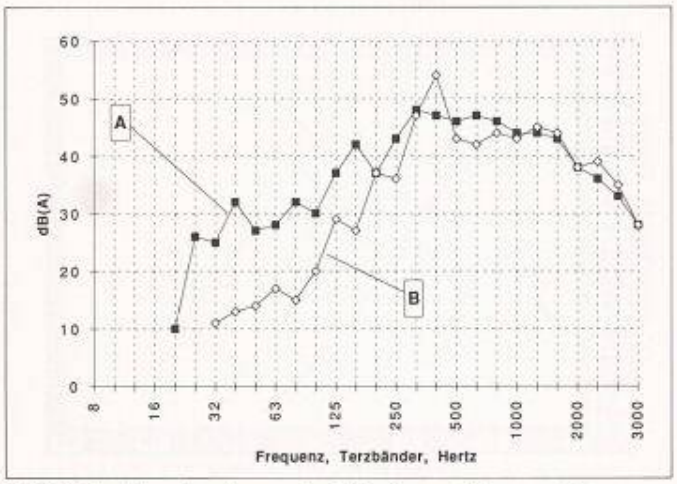


Bild 2. Terzbandspektrum des Schallpegels im geschlossenen Raum, gemittelt über mehrere Zugsvorbeifahrten: A Messung innen; B Messung aussen abzüglich gemessene Schalldämmung der Gebäudehülle

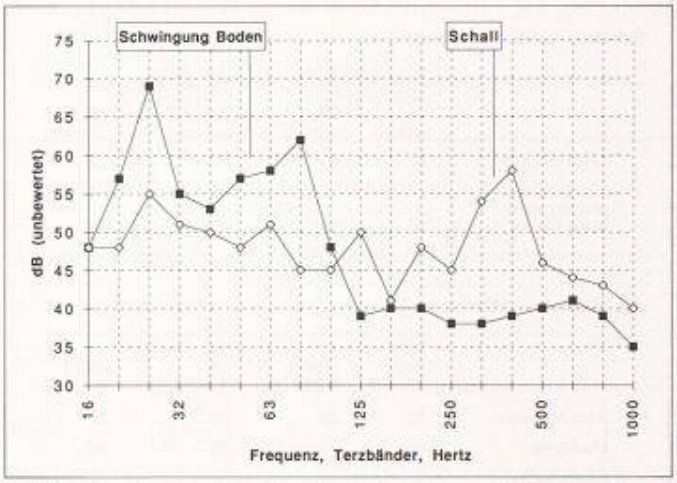


Bild 3. Spektrum des Schallpegels im geschlossenen Raum und der Bodenschwingungen in Raummitte, gemittelt über mehrere Zugsvorbeifahrten; Schall: [dB] linear; Schwingung: v_{rms} [dB; re 5 x 10^{-5} mm/s]

Messung

Bei der Messung von abgestrahltem Körperschall ist zwischen zwei Fällen zu unterscheiden:

- reiner Körperschall ohne Aussenlärmanteile (z.B. Tunnel)
- Körperschall zusammen mit Aussenlärm, der durch die Gebäudehülle eindringt.

Im ersten Fall kann der abgestrahlte Körperschall direkt als Schallpegel im geschlossenen Raum gemessen werden. Im zweiten Fall muss versucht werden, den Aussenlärmanteil und den Körperschallanteil zu trennen. Dies gelingt einigermassen, indem gleichzeitig auch der Aussenlärm vor dem Fenster gemessen wird (z.B. Nachbarraum im offenen Fenster) und durch Beschallung mittels Lautsprecher die Schalldämmung der Gebäudehülle ermittelt wird. Das Spektrum des Aussenlärms, abzüglich die spektrale Schalldämmung ergibt das Spektrum des alleinigen Luftschall-Innenpegels. Vergleichen wir dieses Spektrum mit dem gesamten Innenraumschallpegel (Körperschall- und Luftschallanteil), so wird in den meisten Fällen deutlich, dass in den tiefen Frequenzen unterhalb etwa 200 Hz der Körperschallanteil eindeutig dominiert (Bild 2). In der Praxis hat es sich bewährt, das unbewertete Signal mit einem Tiefpass zu filtern und dann über den Frequenzbereich von rund 10 Hz bis 200 Hz den A-bewerteten Schalldruckpegel zu bestimmen.

Der Vergleich des Schwingungsspektrums eines Raumbodens mit dem Innenraum-Schallspektrum (Bild 3) zeigt in vielen Fällen eine weitgehende Übereinstimmung im tiefen Frequenzbereich und dient zusätzlich zur Bestimmung des massgebenden Körperschallfrequenzbereiches. Werden tieffrequente Schwingungen in geschlossene Räume übertragen, so können sie durch Resonanzeinflüsse erheblich verstärkt werden. Dabei spielen nebst den Resonanzschwingungen der raumbegrenzenden Strukturen auch die Eigenschwingungen der Luft in Form von stehenden Wellen im Raum eine erhebliche Rolle. Solche Resonanzeinflüsse können bei breitbandiger Anregung durch verkehrsbedingten Körperschall in Wohnungen Erhöhungen bis über 10 dB verursachen. Es ist deshalb zweckmässig, die Messung des abgestrahlten Körperschalls in mehreren Räumen mit verschiedener Raumgeometrie vorzunehmen. Inwieweit solche ausserordentliche gebäude- und raumbedingte Verstärkungen bei der Beurteilung überhaupt mit zu berücksichtigen sind, ist eine umstrittene Frage.

Beurteilungsrichtwerte

Das schweizerische Umweltschutzgesetz von 1983 schreibt vor, dass Immissionsgrenzwerte so festzulegen seien, dass nach dem Stand der Wissenschaft oder der Erfahrung Immissionen unterhalb dieser Werte die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht erheblich stören. Im Zusammenhang mit der innerstädtischen Neubaustrecke der Zürcher S-Bahn, wo verschiedene Gebäude unmittelbar unterfahren werden [1], stellte sich in der Schweiz erstmals die Frage nach Immissionsgrenzwerten für verkehrsbedingte Körperschallimmissionen. Aus jahrelangen Diskussionen unter Fachleuten und mit direkt Betroffenen entwickelten sich die in Tabelle 1 aufgeführten *Richtwerte*.

Auch das Ausland kennt bisher nur lückenhafte Ansätze für Körperschallrichtwerte. Als Vergleich zu den Bahn-Richtwerten sind in Tabelle 1 die Richtwerte der deutschen VDI-Norm angegeben. Diese gelten aber in erster Linie nur für Immissionen aus gewerblichen Betrieben. Von Bedeutung ist die unterschiedliche Bewertung der nächtlichen Störung. In den deutschen Normen gilt als Bezugszeit die lauteste Stunde, während in der Schweiz über die ganze Nacht der Mittelwert Leq gebildet wird.

Die schweizerischen Richtwerte geben Anhaltspunkte für die Planung. Sie weisen aber in folgenden Punkten noch Lücken auf:

☐ Bei geringer Zahl können Einzelereignisse trotzdem hohe Immissionspegel aufweisen. Besonders nachts wäre daher zusätzlich eine Lärmobergrenze für das Einzelereignis angebracht (vgl. auch VDI-Richtlinie 2058).

☐ Bei tieffrequenten Geräuschimmissionen kennzeichnet der A-bewertete Gesamtschallpegel das Mass der Störung nur unvollkommen. Alternativen bilden das Zwicker-Verfahren [2] oder der neue Normentwurf DIN 45680 [3].

☐ Körperschallimmissionen treten oft zusammen mit spürbaren Erschütterungen auf. Über die Bewertung der kombinierten Wirkung liegen seit kurzem erste Ergebnisse auch aus Feldversuchen vor [4], [5].

Bild 4 zeigt in einem typischen Beispiel, dass bei den gemessenen Schallimmissionen das Schallpegelmaximum im Bereich von 30 bis 100 Hz liegt. Die Bewertung nach dem DIN-Normentwurf 45680 ergibt im Vergleich mit den Richtwerten für gewerbliche Anlagen zu hohe Immissionen in der Nacht. Bei diesem Verfahren werden nur die Pegel jener Terzbänder zwischen 10 und 80

Schweiz (SBB - Richtwerte)

	Bestehende Anlage IRW, Leq [dBA] Tag 0600-2200	Nacht 2200-0600	Neue Anlage PRW, Leq [dBA] Tag 0600-2200	Nacht 2200-0600
ruhige Wohnzone	40	30	35	25
Mischzone oder erheblich vorbelastete Wohnzone	45	35	40	30

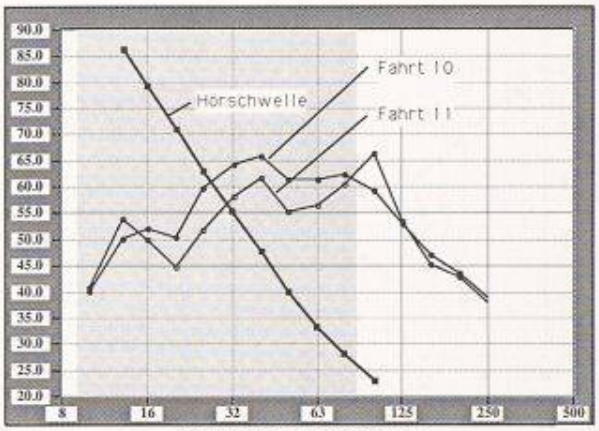
Als Vergleich VDI 2719

	von ..... Leq [dBA] Tag 0600-2200	Nacht laufteste Std.	bis Tag 0600-2200	Nacht laufteste Std.
reine Wohnzone	35	30	30	25
Mischzone	40	35	35	30
ruhebedürftige Arbeitsräume	40	x	30	x

Maximalpegelbeschränkung: 10 dB über Leq

IRW : Immissionsrichtwerte, gültig für bestehende Verkehrsanlagen
PRW : Planungsrichtwerte, gültig für neue Verkehrsanlagen oder neue Bauzonen
Leq : sekundär abgestrahlter Körperschall, energieäquivalenter Dauerschallpegel im geschlossenen Raum, gemittelt über die angegebene Zeitperiode.

Tabelle 1. Richtwerte für Geräuschpegel infolge abgestrahltem Körperschall im Innern von Räumen mit lärmempfindlicher Nutzung



Nach DIN 45680 ermittelte Beurteilungspegel — Richtwerte für gewerbliche Anlagen

F10 L max = 42.11 dB — L max tags 45 dB

F11 L max = 39.16 dB — L max nachts 35 dB

Infolge Tunnelsanierung ist mit einer zusätzlichen Erhöhung der Körperschallimmissionen um 5 bis 10 dB zu rechnen

Bild 4. Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen bei zwei typischen Zugsvorbeifahrten, Messung Rosenbergtunnel St. Gallen, Wohnhaus beim Tunnelportal, Schlafzimmer

Hz, welche über der Hörschwelle liegen, berücksichtigt. Sie werden nach der A-Bewertung gewichtet und energetisch addiert. Die so erhaltenen Lmax sind mit den Richtwerten zu vergleichen. Richtwerte für tieffrequente Geräuschimmissionen aus dem Verkehr fehlen noch.

Massnahmen zur Körperschallreduktion

Aufwand

Über die Massnahmen gegen Körperschall und Erschütterungen bei der Zürcher S-Bahn wurde im Heft 29/91 dieser Zeitschrift berichtet. Grundsätzlich geht es bei allen Massnahmen darum, die Übertragung von Schwingungen auf dem Weg zwischen Fahrbahn und zu schützendem Raum zu dämmen. Je nach Ort der Anwendung lassen sich folgende Systeme unterscheiden:

- Elastische Lagerung der Fahrbahn (Unterschottermatten, Zwischenschichten aus Steinwolle, Glaswolle oder Elastomeren, Masse-Feder-Systeme)
- Trennung zwischen Fahrbahn und Gebäude (Bodenschlitze, Störkörper, Trennfugen)
- Passive Isolation
- Elastische Lagerung und Abisolation ganzer Bauwerke oder einzelner Raumzellen, spezielle Lagerung empfindlicher Geräte.

Alle diese Massnahmen sind sehr aufwendig und mit hohen Kosten verbunden. Eine der günstigsten Methoden bei der Bahn, der Einbau von Unterschottermatten, kostet je nach Mattentyp und Umständen des Einbaus zwischen Fr. 1 000.– bis Fr. 2 000.– je Laufmeter Gleis. Schon für ein einzelnes Objekt in Gleisnähe beträgt die minimal erforderliche Schutzstrecke etwa 80 m. Im Rahmen einer Untersuchung für den Huckepackkorridor hat sich gezeigt, dass die Sanierungskosten bezogen auf die Anzahl zu schützender Gebäude im Durchschnitt Fr. 110 000.– bis Fr. 160 000.– ausmachen. Die Kosten sind erheblich vom Zeitpunkt und den Umständen einer allfälligen Sanierung abhängig.

Das Ausmass und die Art der Massnahmen ist natürlich bedingt durch die erforderliche Schwingungsabminderung. Diese wiederum hängt von den einzuhaltenden Richtwerten ab. Die Untersuchungen für den Huckepackkorridor haben gezeigt, dass mit um 10 dB unterschiedlichen Richtwerten (siehe tiefste und höchste Werte in Tabelle 1) die Anzahl zu schützender Gebäude einmal bei rund 1000, das andere Mal bei über 3000 liegt. Allein für den Huckepackkorridor über den Gotthard können die Sanierungskosten einhundert bis mehrere hundert Millionen Franken betragen. Obwohl die Richtwerte natürlich nach dem Mass der Belästigung der Betroffenen festzulegen sind, darf doch das Ausmass der damit verbundenen Sanierungs- und Vorsorgekosten nicht ganz ausser acht gelassen werden. Es nützt nämlich wenig, strenge Richtwerte einzuführen, aber den Vollzug zu verunmöglichen, weil die Mittel zur Einhaltung nicht bereitgestellt werden können. Ist dies nicht wie mit dem Spatz in der Hand und der Taube auf dem Dach?

Nutzen

Die Wirksamkeit der Massnahmen konnte unter anderem in Zürich bei der S-Bahn und bei der Verlängerung der SZU zum Hauptbahnhof eindrücklich nachgewiesen werden. Selbst dort, wo die Bahn buchstäblich durch den Keller fährt, sind im Gebäude darüber die Zugsvorbeifahrten kaum wahrnehmbar. Verschiedene andere Verkehrsanlagen wurden in letzter Zeit ebenfalls erfolgreich geschützt gegen übermässige Ausbreitung von Körperschall und Erschütterungen. Bei allen diesen Anwendungen hat sich gezeigt, dass nur Lösungen, welche speziell auf den konkreten Fall zugeschnitten sind, zum Erfolg führen. Die von Fall zu Fall sehr unterschiedlichen Randbedingungen und Anforderungen lassen eine Standardisierung der Massnahmen vorläufig noch nicht zu. Einen groben Überblick über die Wirksamkeit verschiedener Systeme bei der Bahn zeigt Bild 6. Die Angaben gelten für eine Vollbahn mit bis zu 25 Tonnen Achslast und Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h. Für bedeutend kleinere Achslasten wie bei Triebfahrzeugen von Schmalspur- und Strassenbahnen ergeben sich eher geringere Dämmleistungen und Verschiebungen

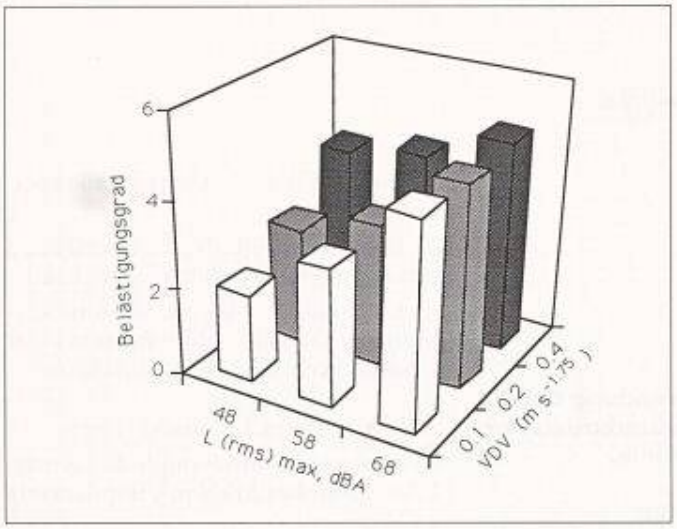


Bild 5. Belästigung durch gleichzeitig auftretende Erschütterungs- und Lärmimmissionen bei Zugsvorbeifahrten, nach Howarth und Griffin [5]

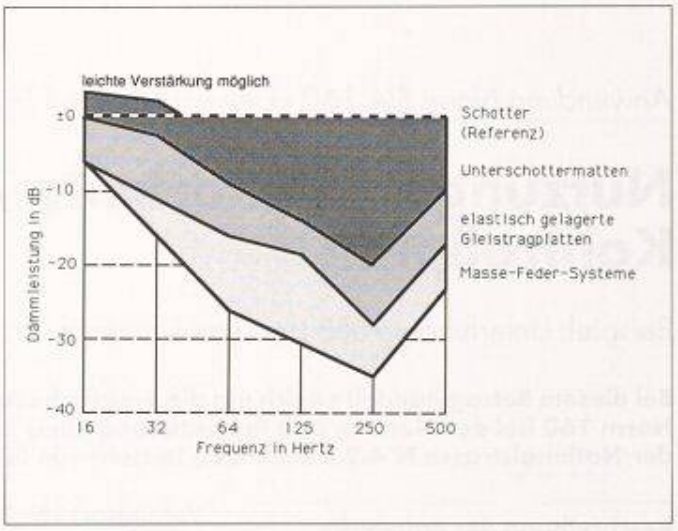


Bild 6. Dämmleistung von Massnahmen im Betriebszustand, gemittelte Werte, Zürcher S-Bahn, SBB und SZU

der Frequenzen nach unten. Bei solchen leichteren Bahnen sind aber auch die Anregungen kleiner.

Auch für elastisch gelagerte Strassenfahrbahnen liegen Erfahrungen vor. Das bekannteste Beispiel für viele Fachleute ist wohl die Leonhardstrasse, welche unter der Polyterrasse durch und direkt über die Mensa der ETH-Zürich führt. Im allgemeinen ist bei Strassen aber vor allem eine völlig ebene Fahrbahn das wichtigste Mittel zur Vermeidung erheblich störender Körperschall- und Erschütterungsimmissionen. Dies bedeutet unter anderem: Fahrbahnübergänge vermeiden oder entsprechend konstruieren; Einlaufschächte, Kontrollschächte usw. ausserhalb der Fahrbahn anordnen.

Schlussfolgerungen

Die Grundlagen für Messung, Berechnung und Bewertung von verkehrsbedingten Körperschallimmissionen sind im Vergleich zum Aussenlärm noch sehr dürftig. Es sind in Forschung und Praxis erhebliche Anstrengungen erforderlich, damit für die grossen Bauvorhaben, vor allem der Bahnen, die erforderlichen Instrumente bereitstehen. Die Erfahrungen mit erfolgreich eingesetzten Massnahmen sind zu erweitern, damit Lösungen mit optimalem Kosten/Nutzen-Verhältnis gefunden werden.

Aus heutiger Sicht lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

☐ Vorschriften, welche nicht eingehalten und nicht kontrolliert werden können, bleiben unwirksam. Bei der Festsetzung von Grenzwerten ist auch zu berücksichtigen, dass sie mit «technisch machbaren und wirtschaftlich tragbaren» Massnahmen erreichbar sind. Sind sie es nicht, so werden Ausnahmegenehmigungen zur Regel.

☐ Unsicherheit und das noch recht hohe Risiko von Fehleinschätzungen führen dazu, dass grosse Sicherheitsspielräume in Anspruch genommen werden. Dies kann zu ungerechtfertigt hohen Kosten führen. Methoden und Grundlagen für Berechnungen und Bewertungen sind zu verbessern. Eine allzu enge Reglementierung auf dem heutigen Stand des Wissens ist eher behindernd, vielmehr sind Forschung und Entwicklung zu fördern.

☐ Bei baulichen Schutzmassnahmen sind von der Planung bis zur Ausführung die Regeln der Dynamik und der Wellenfortpflanzung zu beachten. Diese Regeln sind für viele Baufachleute ungewohnt. Der Beizug von Spezialisten macht sich bezahlt, weil schon kleine konstruktive Fehler die Wirksamkeit einer Massnahme erheblich beeinträchtigen können.

Adresse des Verfassers: *Gérard Rutishauser*, dipl. Bauing. ETH/SIA/ASIC, Rutishauser Ingenieurbüro für Bau, Verkehr und Umwelt, Drahtzugstrasse 18, 8008 Zürich.

Referat gehalten anlässlich des internationalen FASE-Kongresses vom Juli 92 in Zürich.

Literatur

[1] *H.P. Rubi, G. Rutishauser*, et al.: S-Bahn-Technik, Schweizer Ingenieur und Architekt 29 / 91, SIA Zürich 1991

[2] Norm DIN 45631: Berechnung des Lautstärkepegels aus dem Geräuschspektrum. Verfahren nach E. Zwicker, 1967

[3] Normentwurf DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft, Januar 1992

[4] *J. Kastka, R. Paulsen:* Felduntersuchungen zur Wirkung von Lärm und Erschütterungen für verschiedene Quellen, Fortschritte der Akustik - DAGA 91 Bad Honnef: DPG-GmbH 1991

[5] *H. V. C. Howarth and M. J. Griffin:* The relative importance of noise and vibration from railways, Applied Ergonomics, June 1990