

VIBRA-1-2-3: Erkenntnisse aus aktuellen Erschütterungs- und Körperschallmessungen

Marcel Birchmeier, ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich, CH

1 Einleitung

Die Entstehung und Ausbreitung von Erschütterungen im Erdreich infolge Schienenverkehrs, die Übertragung der Erschütterungen auf Gebäude und Geschossdecken und die Umwandlung in hörbaren, sekundär abgestrahlten Luftschall (hier Körperschall genannt) ist mit vielen Unsicherheiten behaftet. Auch stellt jedes Gebäude wegen seiner Struktur, des Aufbaus des Untergrunds bis hin zur Erschütterungsquelle eine ganz neue Situation dar. Dennoch können zwischen den unterschiedlichen Situationen Gemeinsamkeiten festgestellt werden, wenn eine grosse Anzahl Messungen betrachtet wird. Aber auch die Ausnahmefälle können zu wichtigen Erkenntnissen führen. Ziel dieses Beitrags ist interessante Erkenntnisse aus Erschütterungs- und Körperschallmessungen – durchgeführt von ZIEGLER CONSULTANTS – der letzten zwei Jahre zusammengefasst vorzustellen. Ausgehend von einer kurzen Einführung zum Modell VIBRA-1-2-3 werden ausgewählte Beispiele präsentiert, wobei dem Ausbreitungsweg der Erschütterungen gefolgt wird: Erschütterungen bei Weichenüberfahrten mit Schwellenbesohlung, Erschütterungsausbreitung in Hochhäusern und Verstärkung durch Geschossdecken. Im Anschluss werden die Resultate eines umfassenden Vergleichs zwischen den Berechnungen mit den Modellen VIBRA-1 und VIBRA-2 und den durchgeführten Messung präsentiert.

2 VIBRA-1-2-3

Die Problematik der Eisenbahnerschütterung stellt sich zumeist in einer der folgenden drei Formen:

1. Eine neue Eisenbahnlinie, ein zusätzliches Gleis oder auch nur eine neue Weiche ist geplant. Bevor ein solches Projekt realisiert werden kann, ist zu prüfen, ob kein Gebäude im Nahbereich des Gleises in unzulässiger Weise beeinträchtigt wird.
2. Ein neues Wohngebäude, eine ganze Überbauung oder eine Produktionsstätte mit hochempfindlichen Anlagen soll in der Nähe einer bestehenden Eisenbahnlinie gebaut werden. Auch hier ist zu untersuchen, ob die zukünftigen Immissionen im zulässigen Rahmen bleiben oder ob allenfalls beim Bau des projektierten Gebäudes Massnahmen zur Reduktion der Erschütterungen oder des Körperschalls getroffen werden müssen.
3. Bewohner eines bestehenden Gebäudes neben einer bestehenden Eisenbahnlinie beschwerten sich über zu starke Immissionen. Es ist zu prüfen, ob die vorhandenen Im-

missionen innerhalb des von den Normen vorgesehenen Rahmens liegen. Gegebenenfalls sind Massnahmen zu entwickeln, um die Immissionen zu reduzieren.

In allen drei Fällen ist ein vertieftes Verständnis der Vorgänge bei der Ausbreitung der Erschütterungen die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Lösung. Überdies benötigt man ein Rechenmodell, mit dem die komplexen Vorgänge der Erschütterungsausbreitung mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden können.

Als geeignete Lösungsansätze haben sich empirische Modelle erwiesen, die in ihrer einfachsten Form aus einer einzigen Gleichung bestehen können, in der alle wesentlichen Einflussfaktoren in Form von empirisch bestimmten Parametern berücksichtigt werden. Diese einfachen Faktoren-Modelle lassen sich weiterentwickeln, um auch die sehr wichtige Frequenzabhängigkeit der Einflussfaktoren einbeziehen zu können. Dies führt zu den Terzbandspektren-Modellen. Daneben stehen uns die Modelle aus den FE- oder BE-Programmen zur Verfügung, die allerdings den entscheidenden Nachteil aufweisen, dass die für die Berechnung erforderlichen Inputdaten bei der hier vorliegenden Problemstellung nicht in genügender Genauigkeit vorliegen.

Bei VIBRA-1 handelt es sich um ein einfaches frequenz-unabhängiges Faktoren-Modell, bei VIBRA-2 um ein Terzbandspektren-Modell. Die beiden Modelle wurden durch ZIEGLER CONSULTANTS in Zusammenarbeit mit den SBB (Schweizerische Bundesbahnen) auf der Basis des ACCESS-Datenbanksystems als Software-Paket VIBRA-1-2-3 entwickelt.

Bild 2.1 zeigt das Grundkonzept für das einfache Faktoren-Modell (VIBRA-1). Mit einem Ansatz wie in Gleichung 2.1 wird die Schwingungsgeschwindigkeit im Gebäude (beim MP 5) aufgrund der Schwingungsgeschwindigkeit neben dem Gleis (beim MP 1) berechnet. Auf dieselbe Weise berechnet sich auch die Körperschall-Immission, indem die Schwingungsgeschwindigkeit auf der Geschossdecke (beim MP 5) mit dem Umwandlungsfaktor von Erschütterung zu Körperschall multipliziert wird.

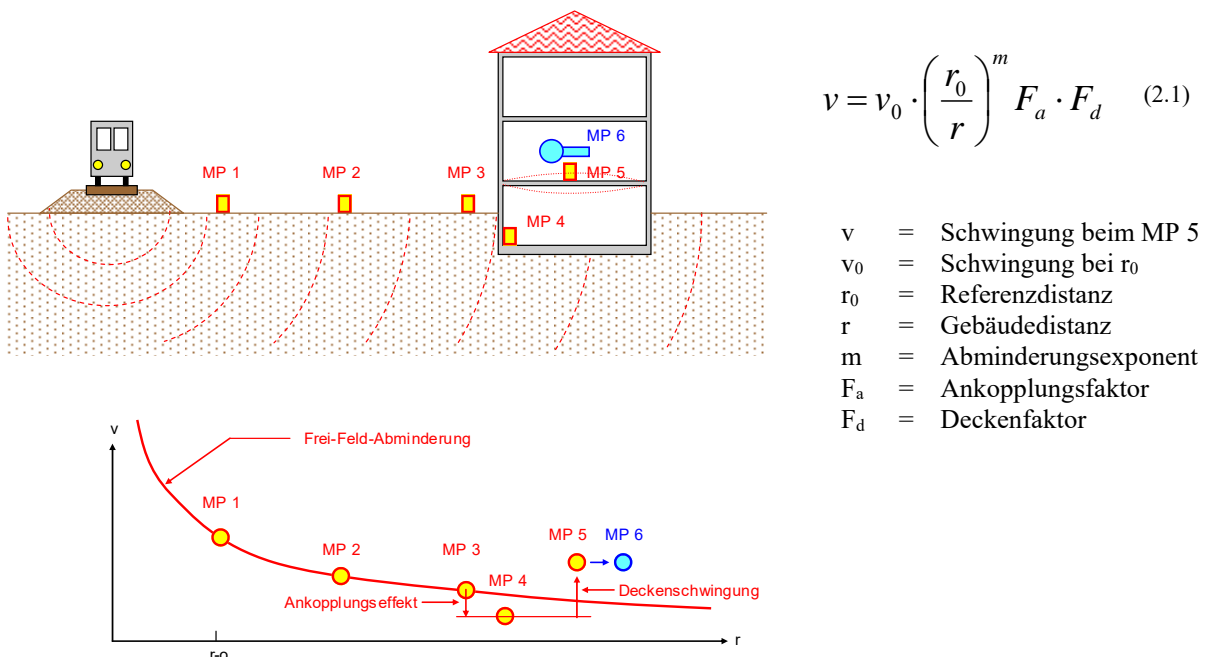


Bild 2.1 Konzept für das Faktoren-Modell VIBRA-1

Dabei werden alle Einflussfaktoren wie z.B. das Abminderungsverhalten im Frei-Feld, der Ankopplungseffekt und die Verstärkung durch die Geschossdecke durch empirisch bestimmte

Parameter berücksichtigt. Wichtig bei diesem Modell ist, dass erstens alle relevanten Einflussfaktoren einbezogen werden und dass zweitens jeder Parameter nur einen Aspekt abdeckt. Gesamthaft werden beim „einfachen Modell“ etwa 10 Parameter benötigt, um eine einigermaßen zuverlässige Prognose für Erschütterung und Körperschall zu erreichen.

Bild 2.2 zeigt den Ablauf beim Terzbandspektren-Modell (VIBRA-2). Hier wird als Ausgangsgrösse ein Quellspektrum, das aus der Erschütterung neben dem Gleis berechnet wird, verwendet. Um nun alle Einflüsse auf dem Übertragungsweg vom Gleis bis ins Wohnzimmer zu berücksichtigen, wird das Quellspektrum mit verschiedenen Transferspektren multipliziert. Dazu gehören die Transferspektren für die Gebäudeankopplung, für die Verstärkung durch die Geschossdecke und je nach Situation auch die Einfügespektren für die Unterschottermatten oder für die elastische Lagerung des Gebäudes. Als Resultat erhält man das Terzbandspektrum für die Schwingung auf der Geschossdecke. Daraus kann durch quadratische Summation der Terzbänder die Schwinggeschwindigkeit (v_{rms}) berechnet werden. Auch die Körperschall-Immission berechnet sich nach diesem Prinzip, indem das Deckenspektrum mit dem Transferspektrum zwischen Erschütterung der Geschossdecke und Körperschall multipliziert wird. Es ist zu beachten, dass dieser letzte Schritt des Transferspektren-Modells „nur“ eine Approximation darstellt, da der Körperschall nicht durch die Schwingung des Fussbodens allein erzeugt wird, sondern auch durch die Schwingungen der Zimmerdecke und der Wände. Deren Schwingverhalten wird bei diesem Vorgehen nicht explizit berücksichtigt.

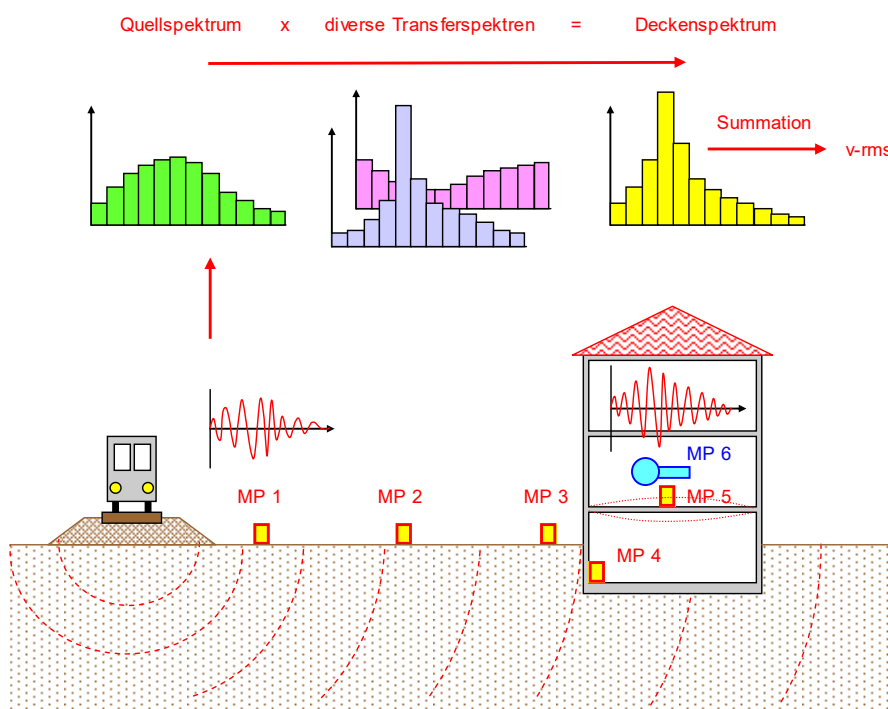


Bild 2.2 Konzept für das Terzbandspektren-Modell VIBRA-2

Um die Faktoren und Terzbandspektren der Modelle VIBRA-1 und 2 zu bestimmen sind möglichst viele Daten von verschiedenen Messreihen erforderlich. Die Datenbank VIBRA-3 erlaubt die wichtigsten Daten jeder Messreihe abzulegen und diese für die erforderlichen Auswertungen aufzubereiten.

Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele zu einzelnen Aspekten der beiden Modelle und die Resultate eines Vergleichs zwischen Modell und Messung gezeigt.

3 Weiche und Schwellenbesohlung

Auf der Eisenbahnstrecke zwischen Bülach und Oberglatt wurde ein neuer Spurwechsel eingebaut. Die beiden Weichen wurden mit unterschiedlichen Schwellenbesohlungen (SB) bestückt: Weiche W3 mit einem weichen Material und Weiche W4 mit einem mittelsteifen Material. Vor und nach dem Einbau der Weichen wurden Erschütterungsmessungen im Frei-Feld auf Höhe der Herzstücke an jeweils denselben Messpunkten durchgeführt. In Uttwil auf der Strecke Kreuzlingen - Romanshorn wurde eine Weiche ohne Schwellenbesohlung durch eine Weiche mit Schwellenbesohlung ersetzt. Nach dem Umbau wurden Erschütterungsmessungen im Frei-Feld auf Höhe des Herzstücks und an einem Referenzabschnitt 100 m vom Herzstück entfernt durchgeführt.

Zur Bestimmung des Einfügespektrums aus den Mittelwert-Terzbandspektren ohne und mit Weiche (Quotient Zustand mit Weiche / Zustand ohne Weiche) wurden in Bülach nur Doppelstock-Züge (S-Bahn) mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 80 km/h ausgewertet, in Uttwil nur S-Bahnzüge in Leichtbauweise mit ungefähr 50 km/h. Bild 3.1 zeigt die Einfügespektren der 3 Weichen. Gegenüber dem Zustand ohne Weiche ergibt sich trotz Schwellenbesohlung bei allen drei Weichen eine klare Verstärkung der Erschütterungen. Es zeigt sich, dass durch den Einbau der Weiche W4 mit mittelsteifer Schwellenbesohlung in Bülach die Erschütterungen überdurchschnittlich stark zugenommen haben (mittlerer Einfügefaktor von 4, gegenüber 2 bei W3 und 2.9 in Uttwil). Obwohl hier im Vergleich zu Weiche W3 ein härteres Material eingebaut wurde, scheint die untypische Verstärkung der Erschütterungen eher andere Ursachen zu haben. Für die weiteren Auswertungen wird dieses Einfügespektrum nicht berücksichtigt.

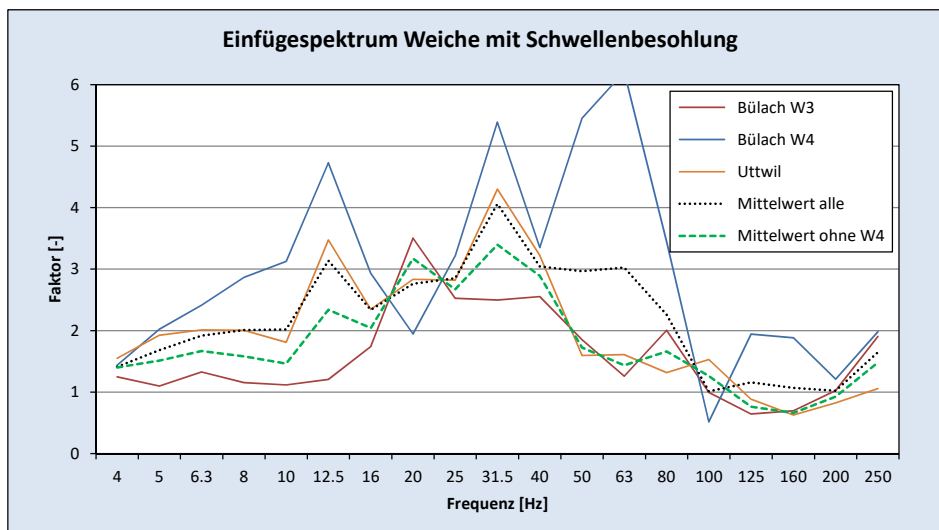


Bild 3.1 Gemessene Einfügespektren für Weichen mit Schwellenbesohlung

Bild 3.2 zeigt zwei Einfügespektren bestimmt aus älteren Messungen bei Weichen ohne Schwellenbesohlung, deren Mittelwert und ein idealisiertes Einfügespektrum. Das Einfügespektrum für die Weiche in Morges wurde aus Messungen vor und nach dem Einbau der Weiche bestimmt, bei der Untersuchung in Winterthur wurden Züge auf einem weiter entfernten Gleis ohne Weiche als Referenz herangezogen.

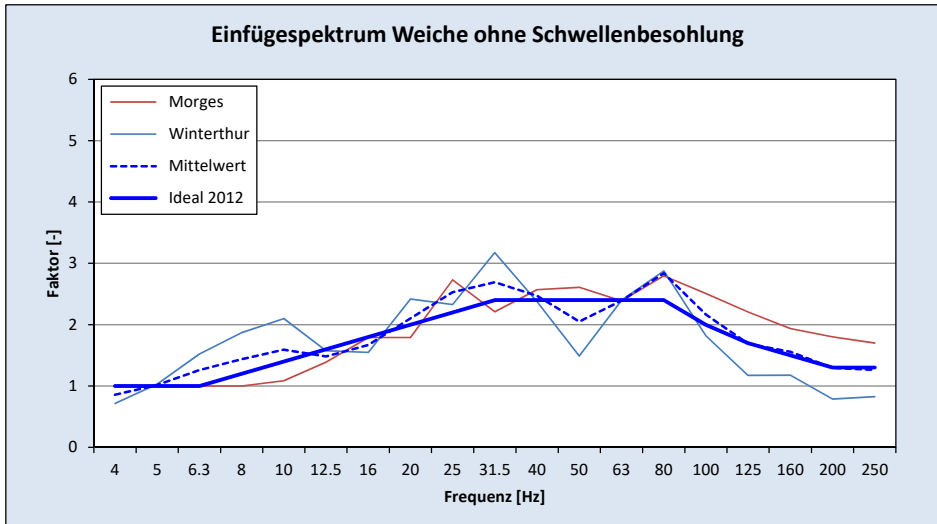


Bild 3.2 Gemessene Einfügespektren für Weichen ohne Schwellenbesohlung

Das Einfügespektrum einer Weiche mit Schwellenbesohlung entspricht im Grunde dem Produkt vom Einfügespektrum einer Weiche ohne Schwellenbesohlung und dem Einfügespektrum der Schwellenbesohlung selbst. Aus den obigen Daten lässt sich ein idealisiertes Einfügespektrum der Schwellenbesohlung definieren, so dass das Produkt mit dem idealisierten Spektrum der Weiche ohne Schwellenbesohlung dem Mittelwert der Spektren der Weichen mit Schwellenbesohlung entspricht. Bild 3.3 zeigt diese idealisierten Spektren und die Mittelwerte der gemessenen Einfügespektren. Eine Schwellenbesohlung (rote Linie) bewirkt demnach eine geringe Verstärkung der Erschütterungen unterhalb 40 Hz und eine geringe Abminderung der Erschütterungen oberhalb 40 Hz. Dies entspricht in etwa dem Verhalten eines Einmassenschwingers (EMS) mit einer Eigenfrequenz von 35 Hz und einer Dämpfungsrate von 60 %, jedoch mit klar schlechterer Reduktionswirkung bei den höheren Frequenzen. Das resultierende idealisierte Einfügespektrum für eine Weiche mit Schwellenbesohlung (grüne Linie) ist dennoch eher optimistisch gewählt, wenn man dieses mit dem Einfügespektrum der Weiche W4 in Bülach in Bild 3.1 vergleicht.

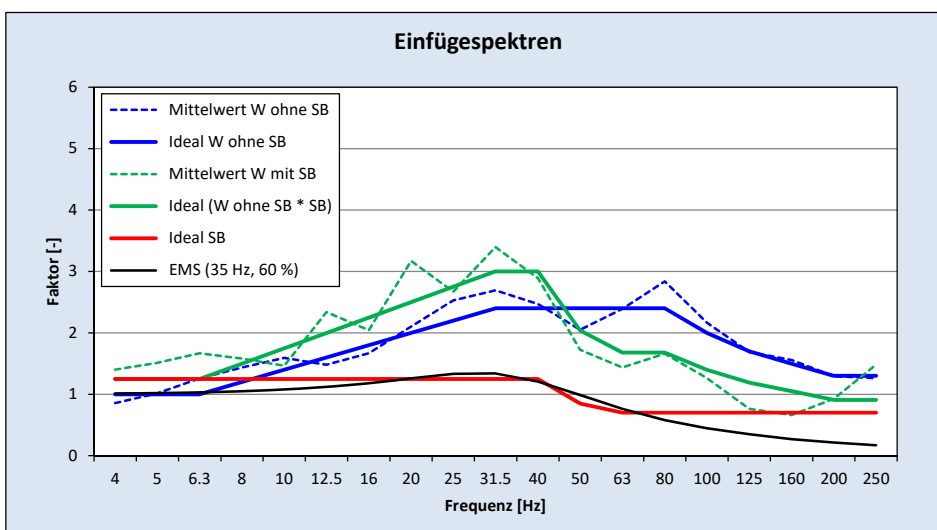


Bild 3.3 Gemittelte und idealisierte Einfügespektren für Weichen ohne und mit Schwellenbesohlung (SB) und für eine Schwellenbesohlung alleine

Fazit

Die Untersuchungen bei Weichen mit Schwellenbesohlung zeigen Folgendes:

- Eine Schwellenbesohlung vermag die durch einen Weicheneinbau verursachten, zusätzlichen Erschütterungen nicht zu kompensieren.
- Unterhalb der Eigenfrequenz der Schwellenbesohlung bei etwa 40 Hz werden die Erschütterungen zusätzlich verstärkt.
- Oberhalb dieser Eigenfrequenz kann eine reduzierende Wirkung durch die Schwellenbesohlung festgestellt werden. Dies kann in anliegenden Gebäuden den hörbaren Körperschall leicht abmindern.

4 Hochhäuser

Hochhäuser haben gegenüber „normalen“ Häusern eine wesentlich höhere Masse pro Grundfläche, weisen eine wesentlich grössere Gebäudehöhe auf und sind zumeist wesentlich tiefer fundiert. Die grössere Masse pro Grundfläche führt dazu, dass die Schwingungsübertragung vom Baugrund auf das Gebäude, der sogenannte Ankopplungsfaktor, geringer ausfällt. Bei Einfamilienhäusern (EFH) liegt der Ankopplungsfaktor zwischen 0.4 und 0.6, bei Mehrfamilienhäusern (MFH) zwischen 0.3 und 0.5 und bei Hochhäusern (HH) zwischen 0.2 und 0.4. Die Form des Ankopplungsspektrums für Hochhäuser ist, wie man in Bild 4.1 sieht, ähnlich wie bei den übrigen Gebäudetypen, doch ist der Frequenzbereich mit starker Reduktion wesentlich breiter.

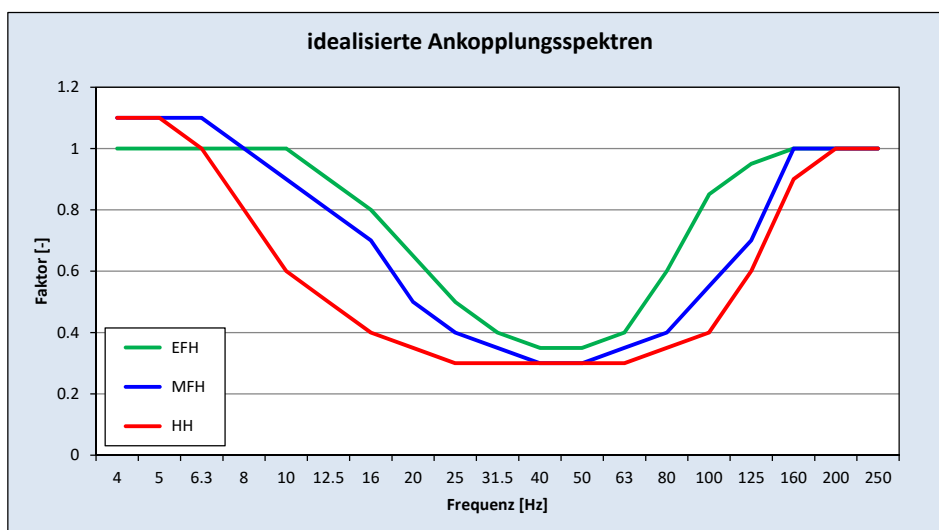


Bild 4.1 Ankopplungsspektren für verschiedene Gebäudetypen

Ein Hochhaus kann aus Sicht der Baudynamik als ein unten eingespannter Stab modelliert werden, der vertikal angeregt wird. Die stärksten Vertikalschwingungen treten dementsprechend am Stabende auf, d.h. im obersten Geschoss. Je nach vertikaler Eigenfrequenz kann diese Verstärkung zwischen 10 % und 100 % liegen. Zudem ist diese Verstärkung sehr frequenzabhängig. Bild 4.2 zeigt die über mehrere Zugdurchfahrten gemittelten Terzbandspektren auf verschiedenen Stockwerken, jeweils beim Gebäudekern gemessen. Im Bereich der vertikalen Eigenfrequenz bei 10 Hz ergibt sich eine Verstärkung von 100 %. Eine Untersuchung an vier Hochhäusern hat das in Bild 4.3 dargestellte Transferspektrum ergeben. Offen-

sichtlich treten die grossen Verstärkungen in den Frequenzen unterhalb 20 Hz auf, d.h. im Bereich der Eigenfrequenzen des Hochhauskerns. Über 30 Hz, d.h. im Frequenzbereich des Körperschalls, liegt sogar eine Abschwächung von bis zu 50 % vor. Dieser Befund muss allerdings noch durch weitere Messungen erhärtet werden.

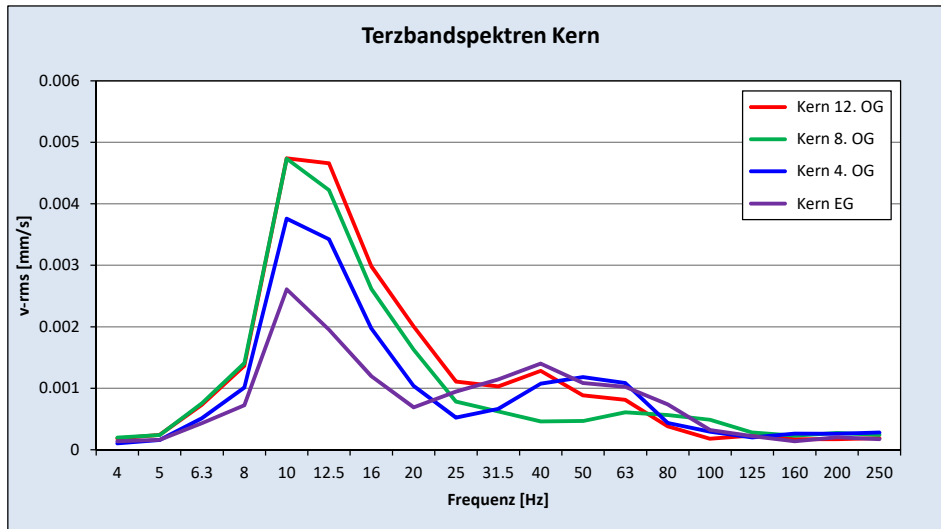


Bild 4.2 Mittelwert-Terzbandspektren

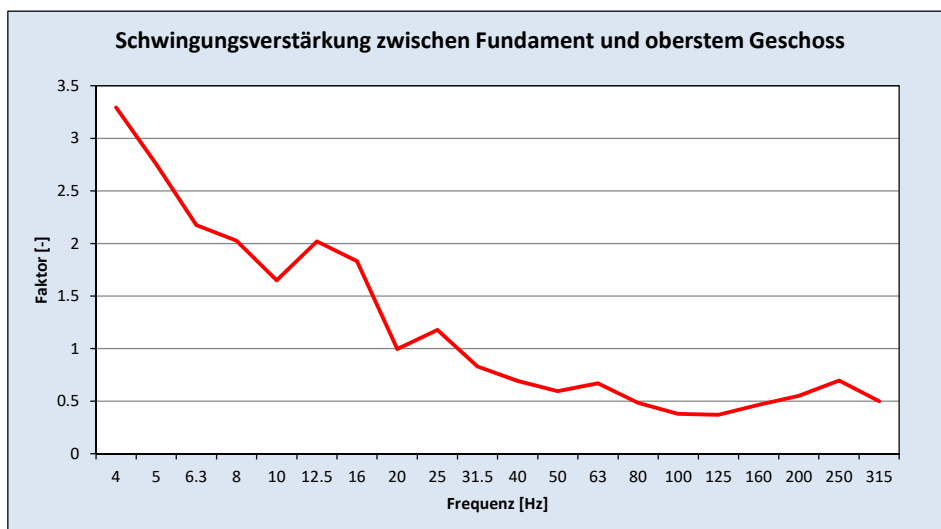


Bild 4.3 Gemitteltetes Transferspektrum

Die zumeist tiefe Fundationskote eines Hochhauses kann sich positiv auswirken. Sie vergrößert den Abstand zwischen dem Gebäudefundament und dem Gleis. Für ein Gebäude in 6 m Distanz vom Gleis mit einer Fundationskote von minus 20 m ist nicht die Distanz von 6 m massgebend für die Erschütterungsübertragung, sondern die schräge Distanz von 20.8 m. Dies kann dazu führen, dass trotz des geringen Abstandes vom Gleis auf eine elastische Lagerung des Gebäudes verzichtet werden kann. Die dem Gleis zugewandte Seite wird man allerdings isolieren müssen.

Beispiele



Bild 4.4 Hochhaus Andreas-Park in Zürich

Das 13-geschossige Hochhaus „Andreas-Park“ in Bild 4.4 befindet sich in 30 m Distanz vom Gleis. Eine Prognoserechnung ergab eine maximale Erschütterung von 0.15 mm/s und einen Körperschall-Vorbeifahrtspegel unter 35 dBA. Eine elastische Lagerung war somit nicht angezeigt. Messungen nach Fertigstellung des Gebäudes ergaben allerdings maximale Erschütterungen von 0.3 mm/s. Solche Immissionen wirken zwar nicht störend, doch stellt sich die Frage, warum die Prognose zu kleine Werte ergeben hatte.

Die Messungen zeigten, dass die maximalen Erschütterungen auf dem Fundament bei 0.013 mm/s liegen und im 12. OG neben dem Kern erreichten sie 0.026 mm/s. Damit weisen sie eine Verstärkung von einem Faktor 2 auf. In Deckenmitte im 12. OG wurde eine Schwingstärke von 0.3 mm/s gemessen, was einem Verstärkungsfaktor von 11.5 entspricht. Die enorme Verstärkung von 0.013 mm/s auf dem Fundament auf 0.30 mm/s in Deckenmitte im 12. OG wurde begünstigt

durch das Zusammenfallen der Eigenfrequenz des Kerns (10 Hz) und der Geschossdecken im 12. OG (12 Hz). Ungünstig wirkte auch die geringe Dämpfung der Geschossdecken von 1 bis 2 %.

Das 15-geschossige Hochhaus „West-Link“ in Zürich-Altstetten (Bilder 4.5a und b) befindet sich in einer Distanz von 12 m von nächstgelegenen Gleis. Prognoserechnungen zeigten, dass – wegen der Wohnungnutzung im 7. bis 15. Geschoss – eine elastische Lagerung unumgänglich war. Der Bauherr hatte sich für eine elastische Lagerung ab dem 7. Geschoss entschieden. Dies erlaubte ein Zuwarten mit dem endgültigen Entscheid für oder gegen eine elastische Lagerung. Zusätzliche Messungen nach Fertigstellung des 1. und 2. Geschosses zeigten dann, dass auf eine elastische Lagerung verzichtet werden konnte. Im Nachhinein stellte sich natürlich die Frage, ob die erste Prognose, die eine elastische Lagerung verlangte, unnötig konservativ war.

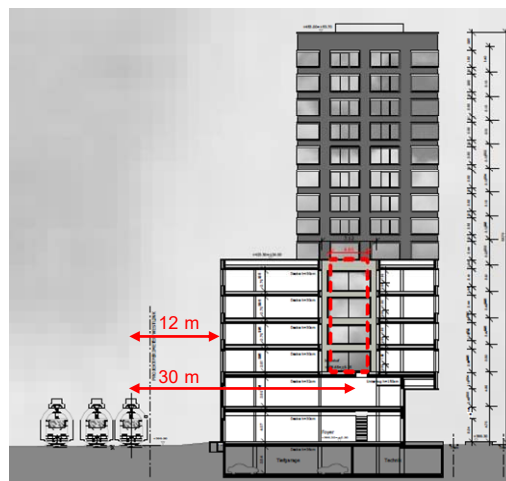
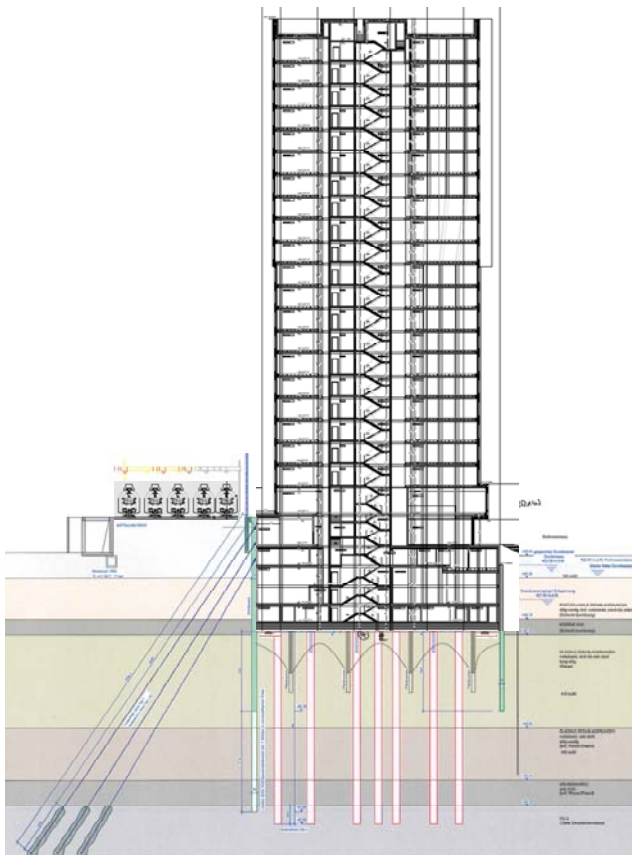


Bild 4.5a Hochhaus West-Link in Zürich

Bild 4.5b Schnitt durch Hochhaus West-Link

Die Messungen zeigten, dass auch in diesem Hochhaus ein Verstärkungsfaktor von 2 zwischen dem Fundament und dem Kern im obersten Geschoss vorliegt. Allerdings nicht bezogen auf einen Fundamentpunkt an der Gebäudefront gegen das Bahngleis, sondern bezogen auf einen Fundamentpunkt des Hochhauskerns. Und dieser befindet sich in einer Distanz von 30 m vom Gleis und nicht in einer Distanz von 12 m, wie die Fassade des 6-geschossigen Trakts (siehe Bild 4.5b). Letzten Endes ergaben sich in den Büroräumen des 6-geschossigen Trakts maximale Erschütterungen von 0.44 mm/s. Prognostiziert waren 0.6 mm/s. In den Wohnungen im 13. OG wurden maximale Schwingungen von 0.21 mm/s gemessen, während die Prognosen – basierend auf der Distanz von 12 m und mit Berücksichtigung des Verstärkungsfaktors von 2 zwischen Fundament und oberstem Geschoss – Werte von 1.2 mm/s voraussagten.


Bild 4.6 Hochhaus Andreas-Turm in Zürich

Das projektierte 25-geschossige Hochhaus „Andreas-Turm“ in Zürich-Oerlikon (Bild 4.6) befindet sich in einer Distanz von 4 m von nächstgelegenen Gleis. Bei dieser geringen Distanz müsste man bei einem „normalen“ Gebäude mit sehr starken Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen rechnen. Eine elastische Lagerung wäre unumgänglich.

Es stellt sich die Frage, ob – unter Berücksichtigung aller Erkenntnisse aus Messungen an vergleichbaren Hochhäusern – tatsächlich eine elastische Lagerung erforderlich ist. Ein wesentlicher Faktor ist die Gründungstiefe von 20 m unterhalb der Schienenkote. Dadurch vergrössert sich der massgebende Abstand von 4 m auf 20.5 m, was die Anregung des Gebäudes ganz erheblich verringert. Um dies zu verifizieren, wurden Messungen in Bohrlöchern vorgenommen. Damit konnte nachgewiesen werden, dass die in der Prognose getroffene Annahme eines massgebenden Abstand

von 20.5 m korrekt waren und auf eine elastische Lagerung der Fundamentplatte verzichtet werden kann. Eine elastische Lagerung der Wand gegen die Gleise ist natürlich trotzdem erforderlich

Fazit

Im Gegensatz zu „normalen“ Gebäuden ist bei Hochhäusern Folgendes zu beachten:

- Wegen der grossen Masse pro Fläche ist die auf ein Hochhaus übertragene Erschütterung geringer als bei einem „normalen“ Gebäude.

- Der Hochhauskern schwingt in seiner vertikalen Eigenfrequenz. Dies kann in den obersten Geschossen zu einer Verdoppelung der vertikalen Schwingungen führen.
- Diese Verstärkung der vertikalen Schwingungen betrifft primär die tieferen Frequenzen. Bei Frequenzen über 30 Hz wird sogar eine Abschwächung beobachtet.
- Bei einem ungünstigen Verhältnis zwischen Eigenfrequenz des Kerns und Eigenfrequenz der Geschosdecken kann es zu extremen Verstärkungen der Deckenschwingungen kommen.

5 Deckenverstärkung

Aufgrund des Schwingungsverhaltens von Geschosdecken verstärken sich die Erschütterungen vom Fundament oder Deckenrand bis zur Deckenmitte bei deren Eigenfrequenzen. Bild 5.1 zeigt die gemessenen Transferspektren von 23 Holzdecken mit einer Eigenfrequenz zwischen 10 und 20 Hz und die Mittelwerte für die Messungen von 2013 bis 2014 (23 Decken) und von 2001 bis 2014 (79 Decken). Der Verstärkungsfaktor bei der Eigenfrequenz liegt zwischen 3.4 und 25, der mittlere Verstärkungsfaktor über den gesamten Frequenzbereich – berechnet aus den RMS-Werten am Gebäudefundament und in Deckenmitte – liegt bei 4.4. Auffallend ist die relativ grosse Streuung.

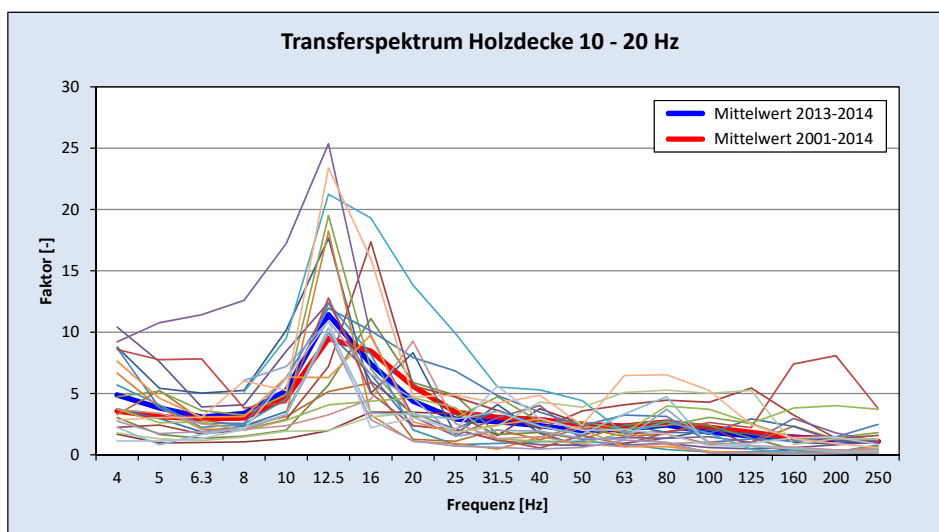


Bild 5.1 Transferspektren für Holzdecken mit Eigenfrequenzen von 10 – 20 Hz.

Bild 5.2a und b zeigen die gemittelten Transferspektren für verschiedene Klassen von Decken. Es zeigt sich, dass bei Holzdecken der maximale Verstärkungsfaktor mit steigender Eigenfrequenz abnimmt. Dies dürfte an der Dämpfung der Holzdecken liegen, die bei höheren Frequenzen grösser ist. Bei Betondecken bleibt der maximale Verstärkungsfaktor in etwa konstant. Dies ist u.a. ein Grund, warum bei Gebäuden mit Betondecken der Körperschall häufiger ein Problem darstellt als bei Holzhäusern. Oberhalb der Überhöhung bei den jeweiligen Eigenfrequenzen liegen die Verstärkungsfaktoren zwischen 2 und 4. Als Vergleich ist das Transferspektrum für einen Ein-Massen-Schwinger (Eigenfrequenz 16 und 20 Hz, 5 % Dämpfungsrate) dargestellt. Der Grund für den grossen Unterschied im höheren Frequenzbereich liegt bei den weiteren Eigenfrequenzen einer Decke, während der Ein-Massen-Schwinger nur eine Eigenfrequenz aufweist. Würde bei einer Immissionsberechnung anstelle der gemessenen Transferspektren das entsprechende Ein-Massen-Schwinger-Modell verwendet werden, würde man insbesondere den Körperschall klar unterschätzen.

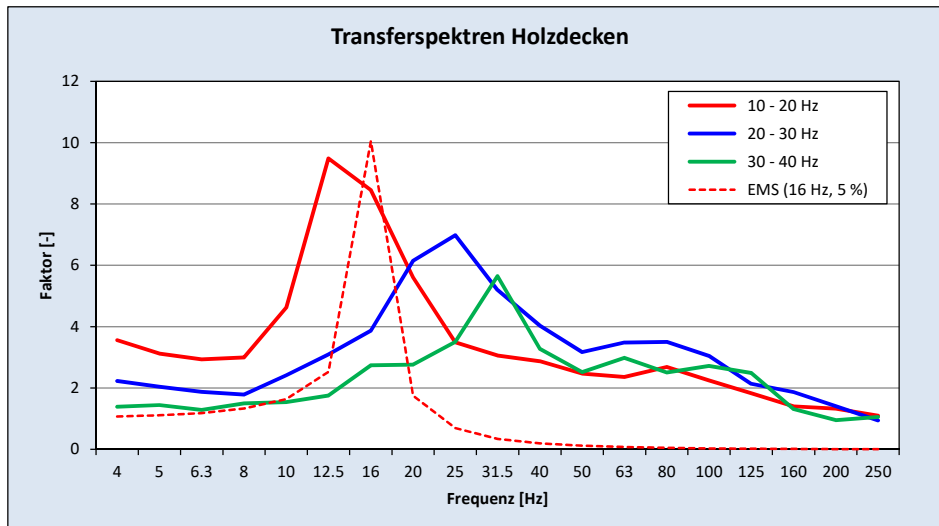


Bild 5.2a Gemessene Transferspektren für Holzdecken

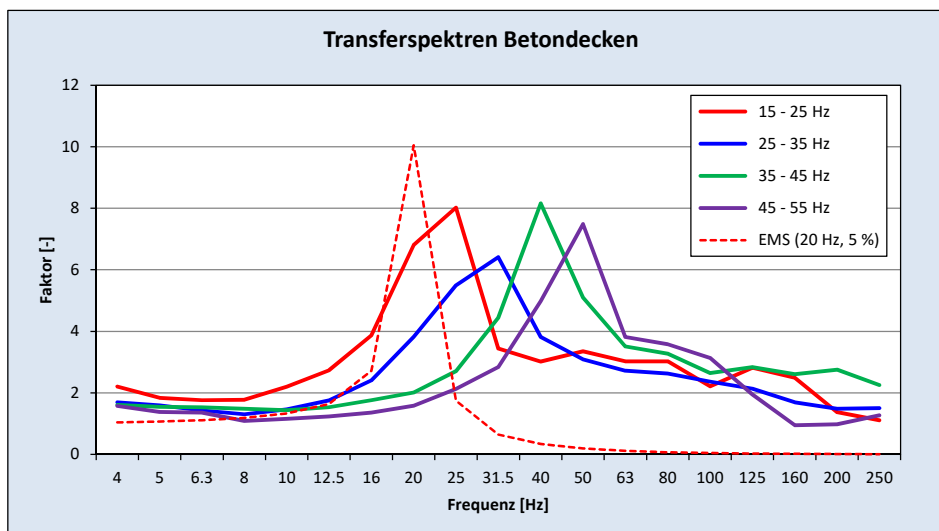


Bild 5.2b Gemessene Transferspektren für Betondecken

Fazit

Die Auswertung der Verstärkung durch Geschossdecken zeigt Folgendes:

- Ein Verstärkungsfaktor von bis zu 10 ist im Bereich der ersten Eigenfrequenz der Decke durchaus realistisch.
- Bedingt durch die höheren Eigenfrequenzen ergibt sich oberhalb der ersten Eigenfrequenz ein Verstärkungsfaktor zwischen 2 und 4.

6 Vergleich Modell – Messung

Ausgehend von den zurzeit in VIBRA-3 erfassten Messreihen wurden für jedes dieser Gebäude eine VIBRA-1 und VIBRA-2-Berechnung mit den aktuellen Parametern durchgeführt. Dabei wurde jeweils der mittlere RMS-Wert der Erschütterung (v_{rms} in mm/s) und der mittlere Vorbeifahrtspegel (L_{Aeq} in dBA) in einem Raum im Gebäude während einer Zugdurchfahrt bestimmt. Es wird unterschieden zwischen Mehrfamilienhäuser (MFH) und Einfamilienhäuser (EFH) mit Beton- oder Holzdecken (B bzw. H).

VIBRA-1

Die VIBRA-1-Berechnung startet mit dem Erfahrungswert der Erschütterung in der Referenzdistanz von 8 m zum Gleis. Bild 6.1a und b zeigt die mit VIBRA-1 berechneten Immissionswerte gegenüber den tatsächlich gemessenen Werten. Punkte unterhalb der roten Linie bedeuten, dass die Messung höhere Immissionswerte ergeben hat als mit VIBRA-1 prognostiziert wurde. Bei der Mehrheit der Gebäude liegt die VIBRA-1-Berechnung auf der sicheren Seite. Zwischen den Gebäudekategorien ist kein wesentlicher Unterschied erkennbar.

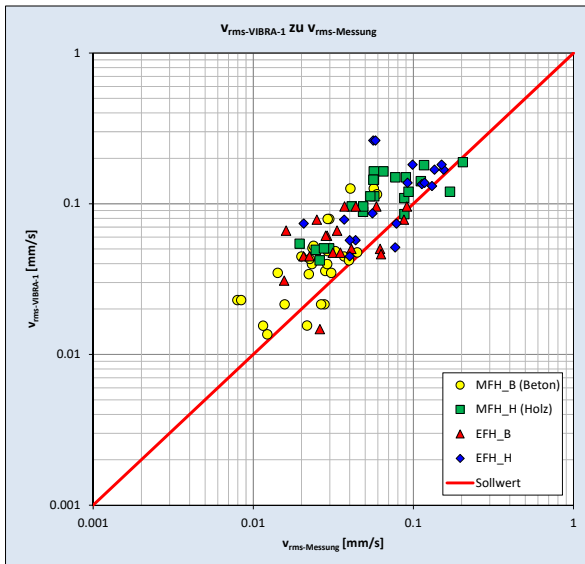


Bild 6.1a v_{rms} -VIBRA-1 gegenüber v_{rms} -Messung

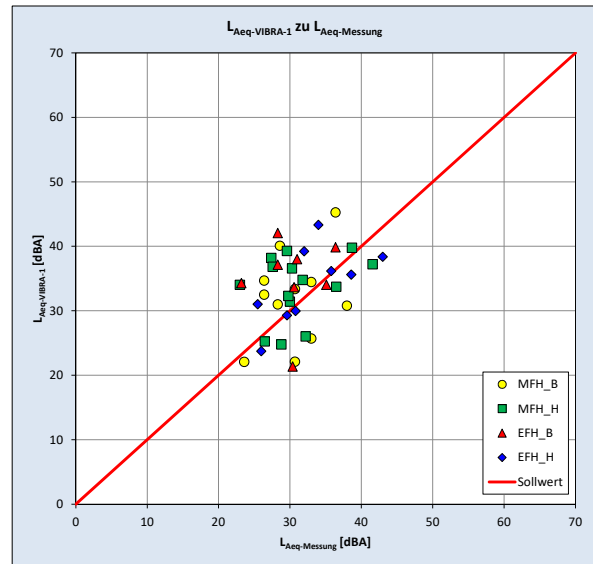


Bild 6.1b L_{Aeq} -VIBRA-1 gegenüber L_{Aeq} -Messung

Tabelle 6.1 zeigt die statistische Auswertung der Faktoren $v_{rms}\text{-Messung} / v_{rms}\text{-VIBRA-1}$ für die Erschütterungswerte und der Differenz $L_{Aeq}\text{-Messung} - L_{Aeq}\text{-VIBRA-1}$ für die Körperschallwerte. Der Messwert der Erschütterung war bei 15 % der Gebäude höher als der mit VIBRA-1 berechnete Wert, im schlechtesten Fall war dies 78 % (Faktor 1.78). Mit der Annahme einer Lognormalverteilung können die Perzentile berechnet werden: In 95 % aller Fälle ist der Messwert kleiner als das 1.296-fache des berechneten Werts. Der Messwert des Körperschalls war bei 38 % der Gebäude höher als der mit VIBRA-1 berechnete Wert, im schlechtesten Fall war dies 9.1 dB. Mit der Annahme einer Normalverteilung können die Perzentile berechnet werden: In 95 % aller Fälle ist der Messwert kleiner als der um 6.26 dB erhöhte Wert der VIBRA-1-Berechnung.

VIBRA-2

Die VIBRA-2-Berechnung startet mit dem gemessenen Frei-Feld-Terzbandspektrum neben dem Gebäude. Bild 6.2a und b zeigt die mit VIBRA-2 berechneten Immissionswerte gegenüber den tatsächlich gemessenen Werten. Punkte unterhalb der roten Linie bedeuten, dass die Messung höhere Immissionswerte ergeben hat als mit VIBRA-2 prognostiziert wurde. Wie die VIBRA-1-Berechnung liegt auch die VIBRA-2-Berechnung bei der Mehrheit der Gebäude auf der sicheren Seite. Zwischen den Gebäudekategorien ist kein wesentlicher Unterschied erkennbar.

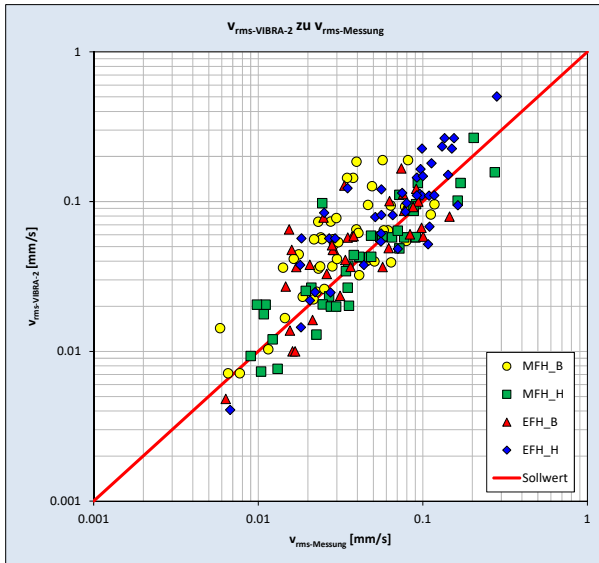


Bild 6.2a V_{rms} -VIBRA-2 gegenüber V_{rms} -Messung

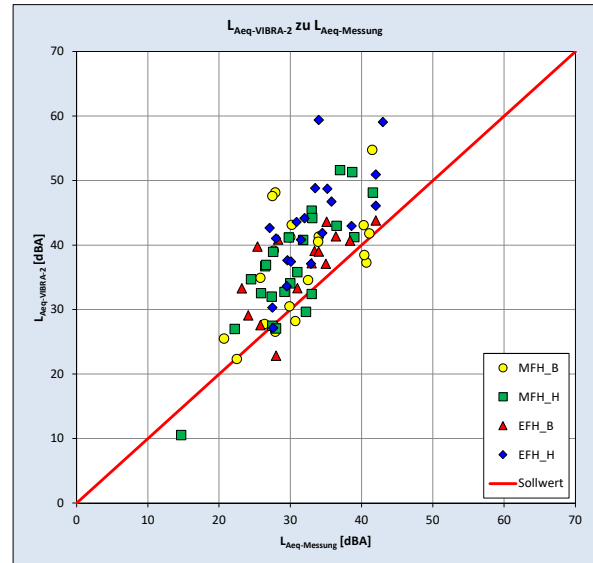


Bild 6.2b L_{Aeq} -VIBRA-2 gegenüber L_{Aeq} -Messung

Tabelle 6.1 zeigt analog zur VIBRA-1-Berechnung die statistische Auswertung der Faktoren V_{rms} -Messung / V_{rms} -VIBRA-2 für die Erschütterung und der Differenz L_{Aeq} -Messung - L_{Aeq} -VIBRA-2 für den Körperschall.

Tabelle 6.1 Statistische Auswertung

	VIBRA-1		VIBRA-2	
	Erschütterung (Messung / VIBRA-1)	Körperschall (Messung - VIBRA-1)	Erschütterung (Messung / VIBRA-2)	Körperschall (Messung - VIBRA-2)
Mittelwert	0.68	- 2.41 dB	0.89	- 6.74 dB
Minimum	0.21	- 13.76 dB	0.21	-25.39 dB
Maximum	1.78	9.07 dB	2.08	5.16 dB
Anzahl	88	42	165	79
Anteil > 1	15 %	38 %	32 %	15 %
P90	1.100	4.34 dB	1.525	1.06 dB
P95	1.296	6.26 dB	1.837	3.27 dB
P99	1.763	9.86 dB	2.609	7.44 dB

Fazit

Der Vergleich zwischen der Berechnung mit VIBRA-1 oder VIBRA-2 und der Messung zeigt Folgendes:

- Mit VIBRA-1 und VIBRA-2 mit den empirisch ermittelten Parametern lässt sich eine vernünftige, nicht zu konservative Immissionsprognose erstellen.

- Ein Faktor 2 bei der Beurteilung der mit VIBRA-1 berechneten Immissionen – wie zurzeit vom BAFU (Bundesamt für Umwelt) bei Bahnprojekten gefordert – ist sinnvoll. Damit dürften bis auf ganz wenige Ausnahmen alle Gebäude mit kritischen Immissionswerten erkannt werden.
- Die Streuung ist relativ gross. Wo immer möglich sollte daher eine direkte Messung der Immissionswerte im Gebäude durchgeführt werden.

7 Schlussbemerkung

Mit Hilfe von empirischen Modellen wie dem VIBRA-1-2-3 lassen sich die Erschütterungsausbreitung durch Schienenverkehr von der Quelle bis zur Geschossdecke eines Gebäudes und die Umwandlung in Körperschall anschaulich beschreiben. Zur Bestimmung der verschiedenen Effekte und Einflussfaktoren sind statistische Auswertungen von Daten vieler Messreihen und gezielte Untersuchungen bei speziellen Situationen erforderlich. In diesem Bericht wurden Beispiele interessanter Erkenntnisse aus aktuellen Messungen vorgestellt:

- Der Einsatz einer Schwellenbesohlung bei einer neugebauten Weiche führt unterhalb etwa 40 Hz zu einer zusätzlichen Verstärkung der Erschütterungen im Vergleich zum Einbau einer Weiche ohne Schwellenbesohlung. Oberhalb 40 Hz kann die Schwellenbesohlung leicht reduzierend wirken. Es bedarf weiterer Messungen um diese Erkenntnisse zu bestätigen.
- Bei der Prognose von Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen für Hochhäuser ist dem grossen Gebäudegewicht, der grossen Gebäudehöhe und der oft grossen Fundationstiefe besondere Beachtung zu schenken. Wie gross die entsprechenden Einflüsse sind, ist auch hier anhand möglichst zahlreicher weiterer Messungen zu untersuchen.

Die Auswertung von grossen Datenmengen zeigt, dass die Streuung des entsprechenden Parameters selbst bei einem einzelnen Vorgang wie z.B. der Deckenverstärkung relativ gross ist. Trotzdem liefert das Produkt der verschiedenen Vorgänge von der Erschütterung neben dem Gleis bis zur Erschütterung oder dem Körperschall in einem Raum im Gebäude – wie dies mit VIBRA-1 und VIBRA-2 modelliert wird – vernünftige und für die Praxis brauchbare Resultate.