

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

Marcel Birchmeier, ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich, CH

1 Einleitung

Die Erzeugung und Ausbreitung von Erschütterungen im Erdreich infolge Schienenverkehrs, die Übertragung der Erschütterung auf Gebäude und Geschossdecken und die Umwandlung in hörbaren, sekundär abgestrahlten Luftschall (hier Körperschall genannt) ist mit vielen Unbekannten behaftet. Auch stellt jedes Gebäude wegen seiner Struktur und des Aufbaus des Untergrunds bis hin zur Erschütterungsquelle eine ganz neue Situation dar. Dennoch können zwischen den unterschiedlichen Situation 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, Unterschottermatte, Gebäudeankopplung, elastische Gebäudelagerung und die Umwandlung von Erschütterung in Körperschall.



Bild 1.1 Weichenüberfahrt in Winterthur

2 VIBRA-1-2-3

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

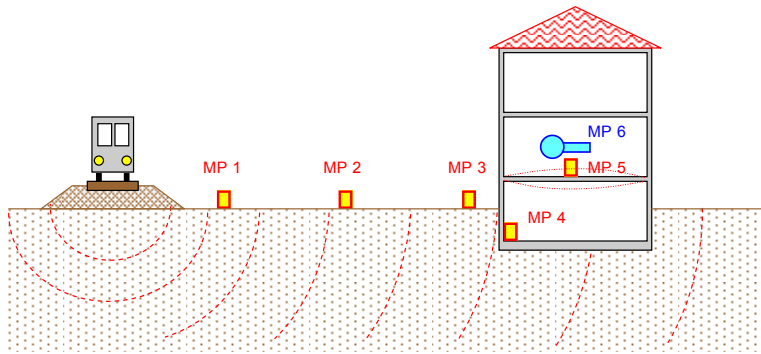
1. Eine neue Eisenbahnlinie, ein zusätzliches Gleis oder auch nur eine neue Weiche ist geplant. Bevor ein solches Projekt realisiert werden kann, ist zu prüfen, ob kein Gebäude im Nahbereich des Gleises in unzulässiger Weise beeinträchtigt wird.
2. Ein neues Wohngebäude, eine ganze Überbauung oder eine 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 Immissionen 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, beim 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 Schwinggeschwindigkeit im Gebäude (beim MP 5) aufgrund der Schwinggeschwindigkeit neben dem Gleis (beim MP 1) berechnet.



$$v = v_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r} \right)^m F_a \cdot F_d \quad (2.1)$$

- v = Schwingung beim MP 5
- v_0 = Schwingung bei r_0
- r_0 = Referenzdistanz
- r = Gebäuedistanz
- m = Abminderungsexponent
- F_a = Ankopplungsfaktor
- F_d = Deckenfaktor

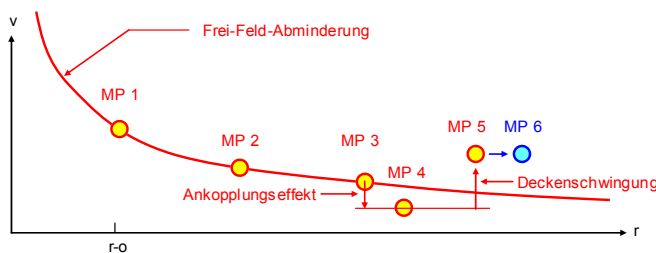


Bild 2.1 Konzept für das Faktoren-Modell VIBRA-1

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.

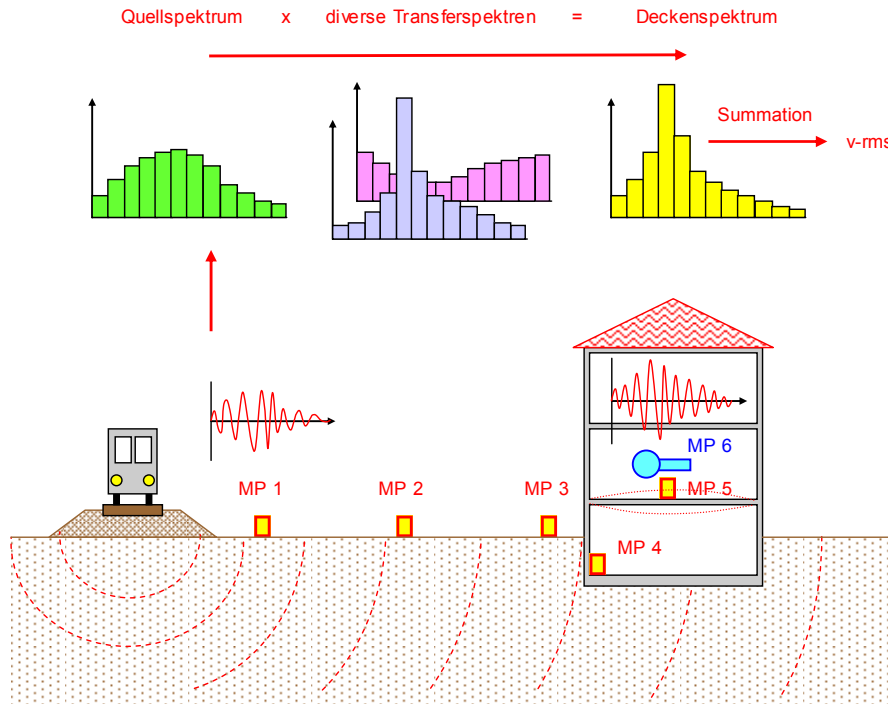


Bild 2.2 Konzept für das Terzbandspektren-Modell VIBRA-2

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 gezeigt.

3 Weiche und Unterschottermatte

Im Rahmen des Projektes Hochgeschwindigkeitsverkehr-Anschluss Zürich-Winterthur wurden auf dem geraden, 3-gleisigen Abschnitt südlich des Bahnhofs Winterthur in Richtung Effretikon eine Weiche mit Unterschottermatte (USM) auf Gleis 1 und ein Spurwechsel (2 Weichen) zwischen Gleis 1 und 2 ohne USM eingebaut (siehe Bild 3.1). Gleis 3 weist keine Weichen auf. Dieser etwa 300 m lange Abschnitt eignet sich somit für Erschütterungsmessungen im Frei-Feld neben einer freien Strecke, neben einer Weiche ohne USM und neben einer Weiche mit USM. Aus den Messdaten lassen sich die Einfügespektren für eine Weiche ohne USM und eine Weiche mit USM herleiten. Im Weiteren wurden vor und nach dem Einbau der Weiche mit USM in einem Wohngebäude Messungen durchgeführt. Das Wohnhaus befindet sich ca. 45 m neben dem Herzstück der Weiche, jedoch noch im Bereich mit USM

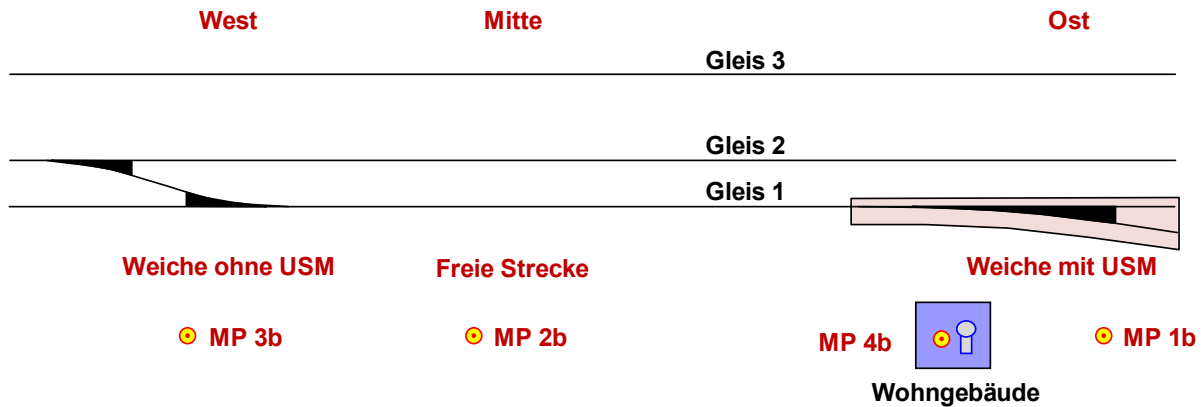


Bild 3.1 Schematische Situation Winterthur

In Bild 3.2 sind die RMS-Werte der Erschütterungen einzelner Zugdurchfahrten auf Gleis 1 und Gleis 3 für die verschiedenen Streckenabschnitte dargestellt. Während bei Zugdurchfahrten auf Gleis 1 die Erschütterungen bei der Weiche ohne USM (West) am stärksten sind, sind jene bei der Weiche mit USM (Ost) etwa gleich stark wie bei der freien Strecke (Mitte). Allerdings nehmen die Erschütterungen von West nach Ost auch bei Zugdurchfahrten auf Gleis 3 (keine Weichenüberfahrten) ab.

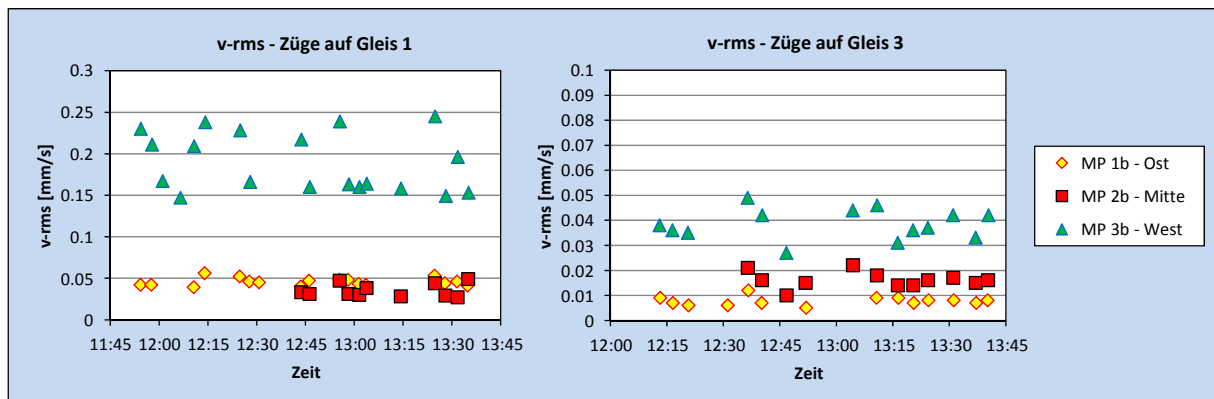


Bild 3.2 RMS-Werte der Erschütterung einzelner Zugdurchfahrten

Dies zeigt sich auch, wenn man die Quotienten der gemittelten Terzbandspektren zwischen West und Mitte und zwischen Ost und Mitte für Züge auf Gleis 3 betrachtet (siehe Bild 3.3), bei denen es grosse Abweichungen zum Sollwert von 1 gibt. Grund könnten unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten sein. Hingegen entspricht der Quotient zwischen den Terzbandspektren von Zügen auf Gleis 1 und 3 bei der freien Strecke in etwa dem Sollwert. Die Messung bei der freien Strecke eignet sich daher nicht als Referenzmessung, die für die Bestimmung der Einfügespektren der Weiche ohne USM und der Weiche mit USM benötigt wird. Als Referenzmessungen können jedoch für jeden Bereich separat die distanzkorrigierten Messdaten der Zugdurchfahrten auf Gleis 3 genutzt werden. Bei der Distanzkorrektur wird das Gleis 3 fiktiv an die Position des Gleis 1 verschoben. Hierzu wurde der Ansatz $v_{3,korr} = v_3 * (r_3 / r_1)$ verwendet, wobei der Index das Gleis bezeichnet und r die Distanz zwischen Messpunkt und Gleis.

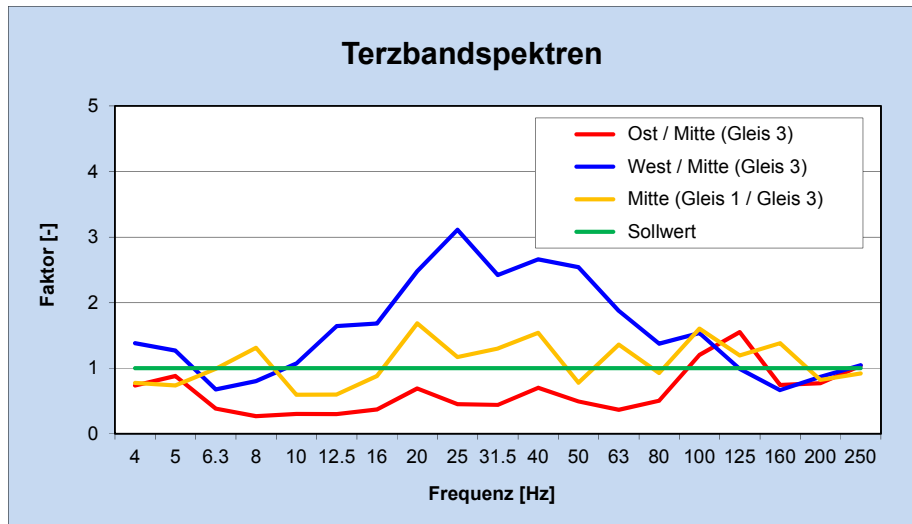


Bild 3.3 Quotientenspektren zwischen den Abschnitten ohne Weichen

Bild 3.4a zeigt das Einfügespektrum für die Weiche ohne USM. Als Vergleich ist auch das bei einer anderen Messung bestimmte Einfügespektrum gezeigt. Die Werte liegen zwischen 1 und 3, das bedeutet, dass sich über den gesamten Frequenzbereich eine Verstärkung infolge der Weiche ergibt. Der aus den distanzkorrigierten mittleren RMS-Werten berechnete Faktor beträgt 2.1. Dies stützt den in VIBRA-1 definierten Faktor von 2 für das Einfügen einer Weiche. Bild 3.4b zeigt das Einfügespektrum für die Weiche mit USM. Auch hier liegen die Werte im Frequenzbereich von 16 Hz bis 80 Hz deutlich über 1 und auch oberhalb 100 Hz sind sie nur unwesentlich kleiner als 1. Somit ergibt sich erst ab 100 Hz eine schwache Reduktion der Erschütterungen. Der aus den distanzkorrigierten mittleren RMS-Werten berechnete Faktor beträgt 3.1. Es zeigt sich, dass die durch die Weiche verursachte Zunahme der Erschütterungen durch die USM nicht kompensiert werden kann. Vergleicht man die beiden Einfügespektren aus Bild 3.4a und b, so kann festgestellt werden, dass die zusätzlichen Erschütterungen durch die Weiche ohne USM nicht grösser sind als diejenigen verursacht durch die Weiche mit USM.

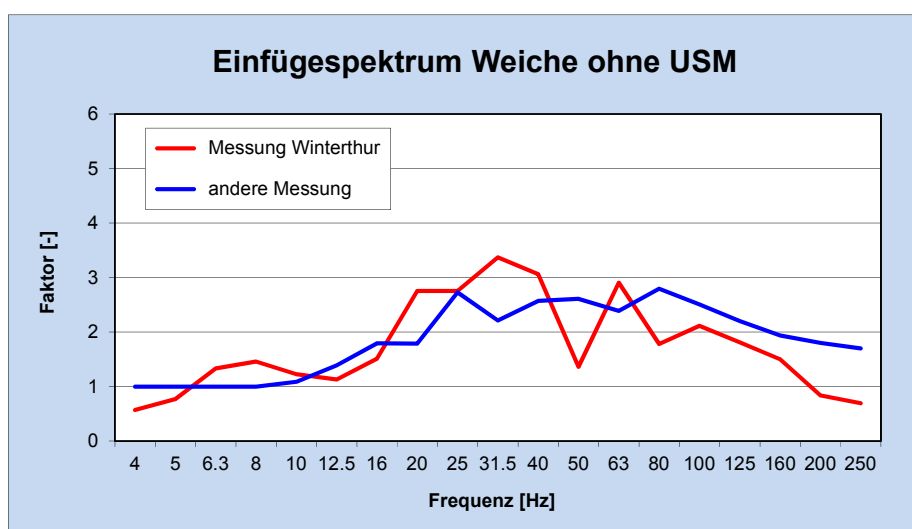


Bild 3.4a Einfügespektrum der Weiche ohne USM

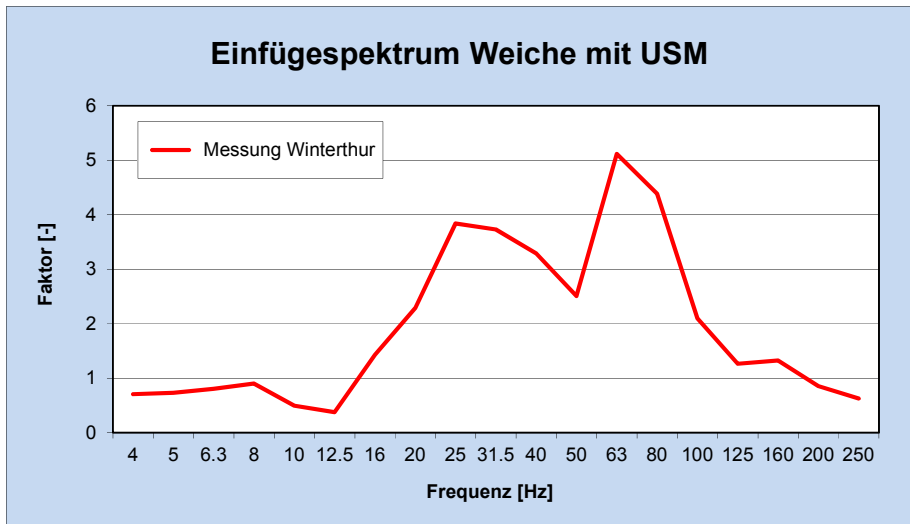


Bild 3.4b Einfügespektrum der Weiche mit USM

In Bild 3.5 sind für denselben Raum im Wohngebäude im Abschnitt Ost die KB_{FTT} -Werte und die L_{Aeq} -Werte gemäss BEKS vor und nach dem Einbau der Weiche mit USM dargestellt. Es wurden Zugdurchfahrten auf allen drei Gleisen und bei beiden Messungen in etwa gleichviele Züge berücksichtigt. Bei den Erschütterungen ergibt sich nach dem Weicheneinbau mit USM eine leichte Zunahme gegenüber vor dem Einbau, während sich bei den Körperschallwerten eine klare Reduktion zeigt.

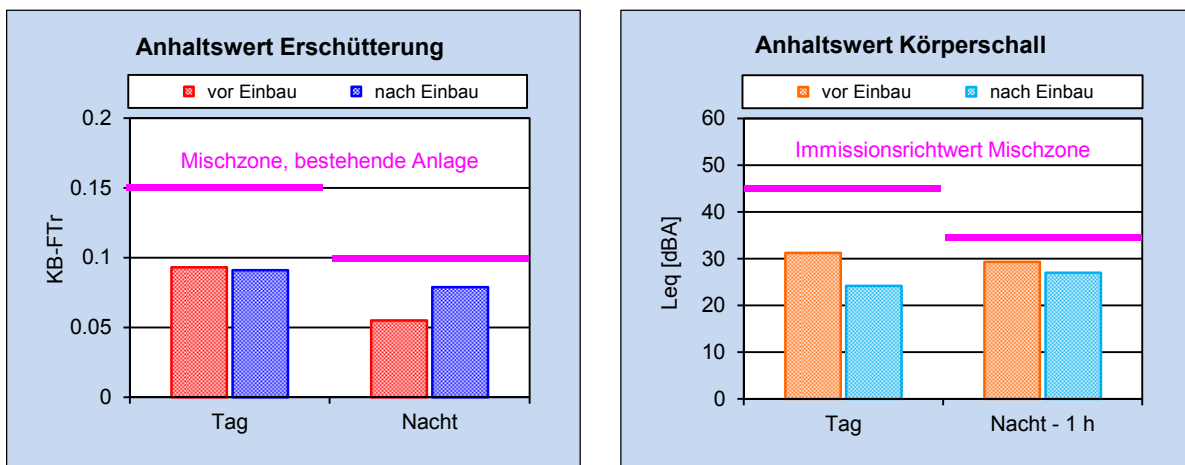


Bild 3.5 Vergleich mit den Richtwerten der BEKS für Erschütterungen (links) und Körperschall (rechts) vor und nach dem Einbau der Weiche mit USM

Bei der Betrachtung der gemittelten Terzbandspektren der Erschütterungen auf der Geschossdecke von Zügen nur auf Gleis 1 (siehe Bild 3.6) sieht man klar, dass sich die Amplituden oberhalb 63 Hz mit dem Einbau der Weiche mit USM reduziert haben. Beim Frei-Feld-Messpunkt ist zwischen 25 Hz und 40 Hz zudem eine leichte Erhöhung der Amplituden nach dem Einbau zu erkennen. Diese Effekte können auf die Wirkung der USM zurückgeführt werden. Den reduzierenden Effekt sieht man auch bei den entsprechenden Terzbandspektren des Schalldrucks (siehe Bild 3.7). Da die USM nur die Erschütterungsanteile bei höheren Frequenzen effizient reduziert, ist die reduzierende Wirkung der USM vor allem beim Körperschall feststellbar, während sich die Erschütterungen je nach Eigenfrequenzen der Geschossdecken im Gebäude sogar verstärken können.

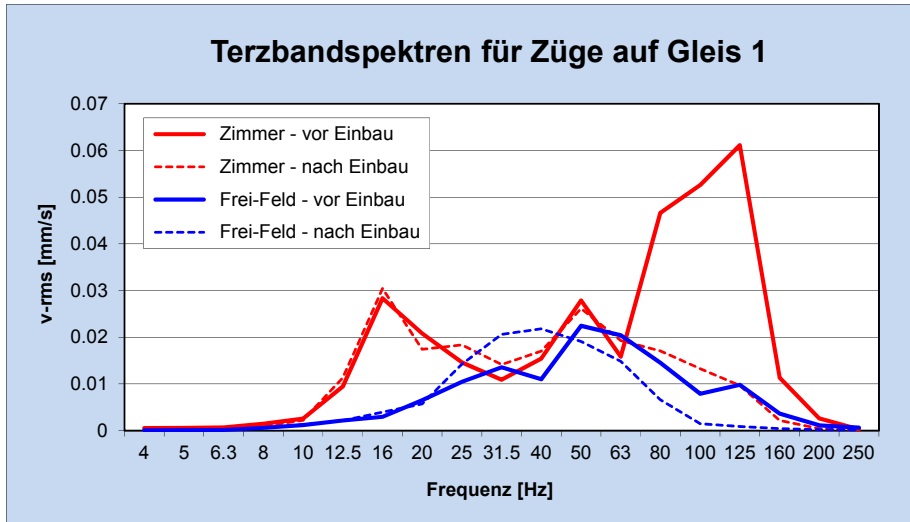


Bild 3.6 Terzbandspektren der Erschütterungen im und neben dem Wohngebäude vor und nach dem Einbau der Weiche mit USM

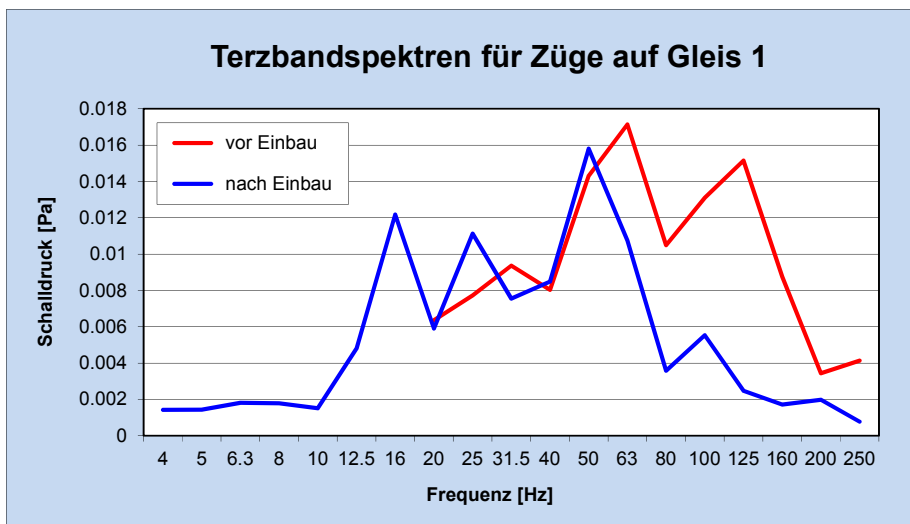


Bild 3.7 Terzbandspektren des Schalldrucks im Wohngebäude vor und nach dem Einbau der Weiche mit USM

Tabelle 3.1 zeigt die Auswertung der Schallmessdaten für Zugdurchfahrten auf Gleis 1 vor und nach dem Einbau der Weiche mit USM. Der Vorbeifahrtspegel reduziert sich bezogen auf die Messung vor dem Einbau um etwa 9 dB.

Tabelle 3.1 Auswertung der Schallmessdaten für Zugdurchfahrten auf Gleis 1

	Messung vor Einbau	Messung nach Einbau
Mittlerer Vorbeifahrtspegel $L_{Aeq,avg}$ [dBA]	44.2	35.1
Bereich L_{Aeq} [dBA]	36.7 - 50.5	31.8 - 39.2
Anzahl Züge	33	27

Aus den Daten der Zugdurchfahrten auf Gleis 1 vor und nach dem Einbau lässt sich das Einfügespektrum für die Weiche mit USM berechnen (siehe Bild 3.8). Es zeigen sich typische Eigenschaften einer USM: Unterhalb der Eigenfrequenz der USM bei ca. 40 Hz ist der Faktor ungefähr 1, oberhalb deutlich kleiner als 1. Das zweite bewirkt die starke Reduktion bei den Körperschallwerten bezogen auf die Messung vor dem Einbau. Bei Faktoren über 1 ergibt sich eine Zunahme der Immissionen gegenüber der Messung vor dem Einbau, was die leicht höheren Erschütterungswerte erklärt. Vergleicht man dieses Einfügespektrum mit jenem aus Bild 3.4b (aus Messung auf Höhe Herzstück), so kann man daraus schliessen, dass beim Wohnhaus der Einfluss der Weiche wegen des grossen Abstands zum Herzstück minimal ist und es sich beim Spektrum in Bild 3.8 wohl eher um ein Einfügespektrum der USM alleine handelt. Auch anhand dieser Messung ist es daher fraglich, ob die USM die zusätzlichen Erschütterungen durch die Weiche – betrachtet auf Höhe des Herzstücks – kompensieren würde.

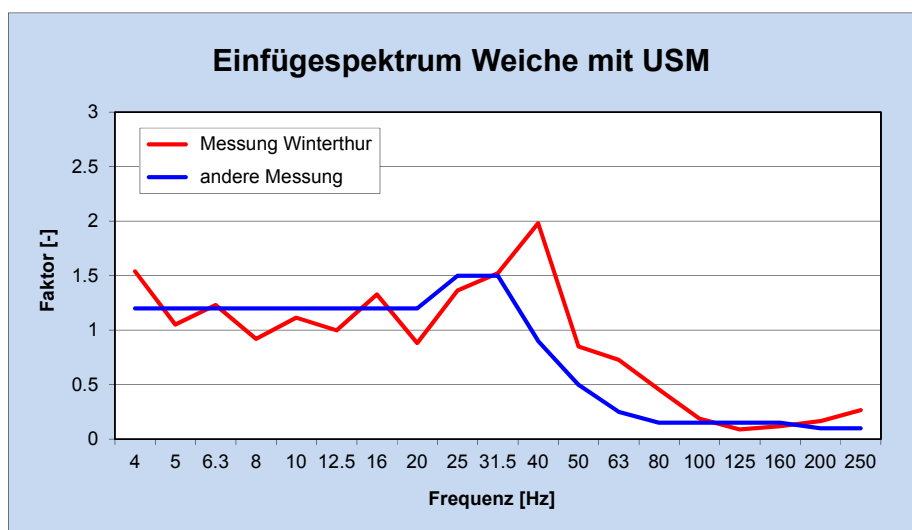


Bild 3.8 Einfügespektrum der Weiche mit USM und Einfügespektrum einer USM (idealisiert aus anderer Messung)

4 Gebäudeankopplung

Um die Ankopplung eines Gebäudes an das umgebende Erdreich zu beschreiben, kann man möglichst viele verschiedene Messreihen betrachten. Bei der statistischen Auswertung (siehe Tabelle 4.1) des Ankopplungsfaktors – Quotient zwischen v_{rms} am Gebäudefundament und v_{rms} im Frei-Feld neben dem Gebäude – wird unterschieden zwischen Einfamilienhäusern (EFH), Mehrfamilienhäusern (MFH) bis 7 Geschosse und Hochhäusern (HH) mit 8 oder mehr Geschossen. In Bild 4.1 ist die Distanzabhängigkeit der Ankopplungsfaktoren für Mehrfamilien- und Hochhäuser gruppiert nach Anzahl Geschosse dargestellt. Es zeigt sich klar, dass schwere Gebäude mit 8 und mehr Geschossen tendenziell einen tieferen Ankopplungsfaktor aufweisen als Gebäude mit weniger als 8 Geschossen. Die mittleren Ankopplungsfaktoren für Mehrfamilien- und Hochhäuser liegen bei 0.38 bzw. 0.25. Ein Trend bei der Distanzabhängigkeit ist weder bei den Mehrfamilienhäusern noch bei den Hochhäusern erkennbar.

Tabelle 4.1 Statistische Auswertung der Ankopplungsfaktoren

Gebäude-Typ	Ankopplungsfaktor	COV	Bereich	Anzahl Gebäude
EFH	0.41	0.37	0.10 - 0.73	44
MFH	0.38	0.34	0.15 - 0.70	44
HH	0.25	0.46	0.10 - 0.44	6

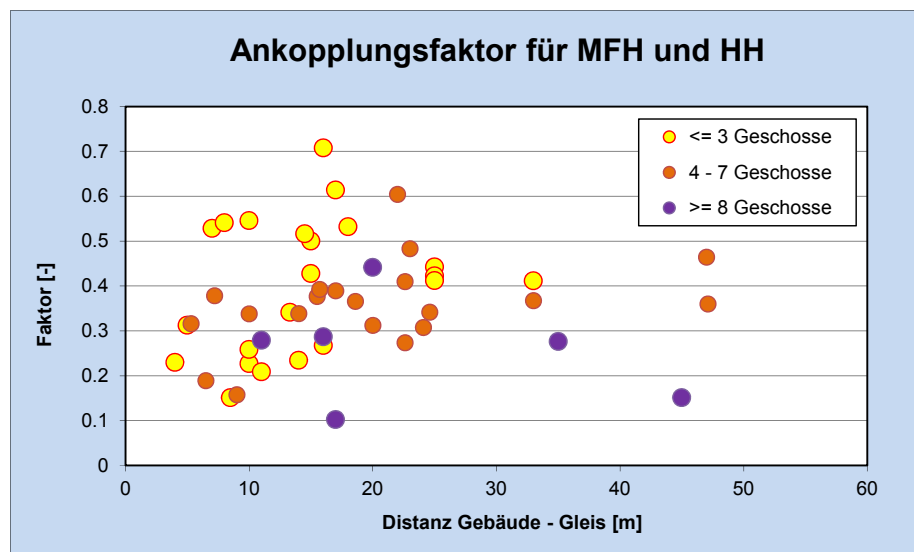


Bild 4.1 Ankopplungsfaktoren in Funktion der Distanz

Bild 4.2 zeigt die gemittelten Transferspektren der Gebäudeankopplung für die verschiedenen Gebäudegruppen. Auch hier kann man erkennen, dass bei einem eher leichten Einfamilienhaus die Erschütterungen besser auf das Gebäude übertragen werden als bei schweren Hochhäusern. Um diese Beobachtung breiter abzustützen, sind weitere Messungen insbesondere bei Hochhäusern erforderlich.

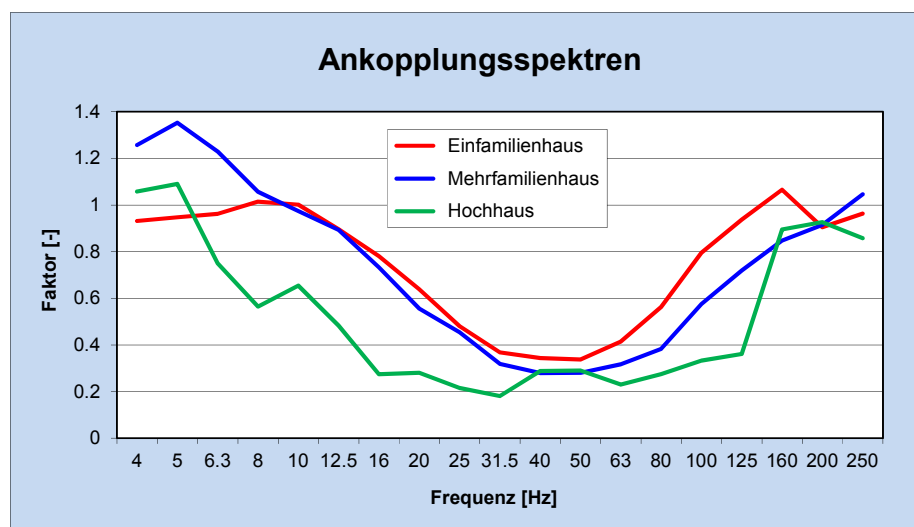


Bild 4.2 Ankopplungsspektren

5 Elastische Gebäudelagerung

Unmittelbar neben dem Gleisfeld des Hauptbahnhofs Zürich stehen zwei Wohngebäude ähnlicher Bauart direkt nebeneinander: Das eine ist vollflächig elastisch gelagert, das andere weist keine elastische Lagerung auf. Bei beiden Gebäuden beträgt der Abstand zum nächsten, befahrenen Gleis ca. 12 m und in beiden Gebäuden wurden Erschütterungs- und Körperschallmessungen durchgeführt. In Bild 5.1 ist die Wahrnehmung der Immissionen graphisch dargestellt. Im Gebäude ohne elastische Lagerung sind sowohl die Erschütterungen wie auch der Körperschall gut wahrnehmbar und werden klar als störend empfunden. Im Gebäude mit elastischer Lagerung sind nur die schlimmsten Zugsvorbeifahrten wahrnehmbar.

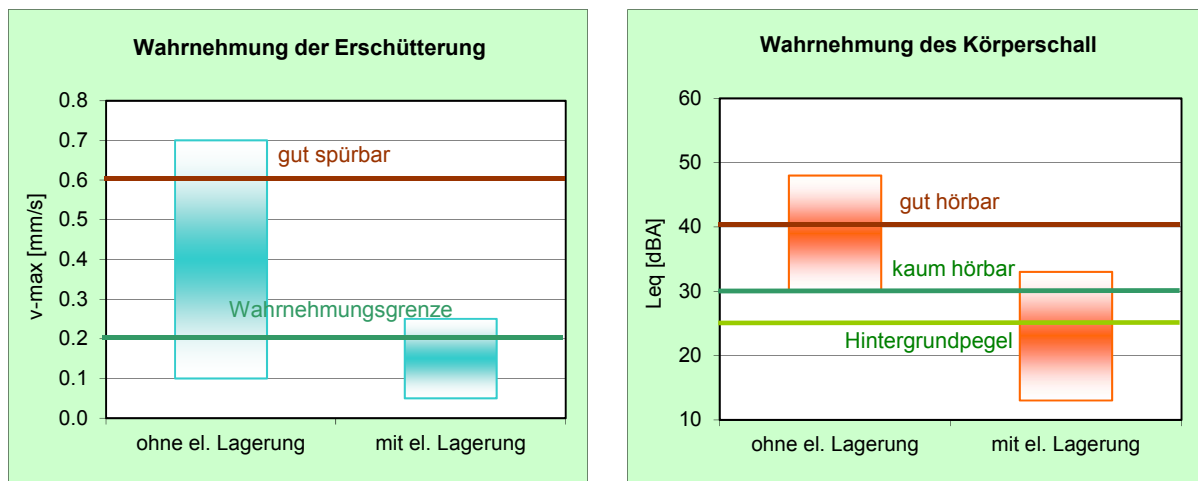


Bild 5.1 Wahrnehmung der Erschütterungen und des Körperschalls im Gebäude ohne bzw. im Gebäude mit elastischer Lagerung

Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung der Immissionswerte gemäss BEKS (siehe Bild 5.2). Interessant ist insbesondere der Vergleich mit den Richtwerten (Neue Anlage, Mischzone). Die Richtwerte werden bei beiden Gebäuden eingehalten, obwohl beim Gebäude ohne elastische Lagerung die Immissionen klar als störend empfunden werden. Dieses Beispiel zeigt auch, dass die Richtwerte der BEKS für die Beurteilung von Immissionsprognosen in privaten Wohnungsneubauten eher grosszügig festgelegt sind.

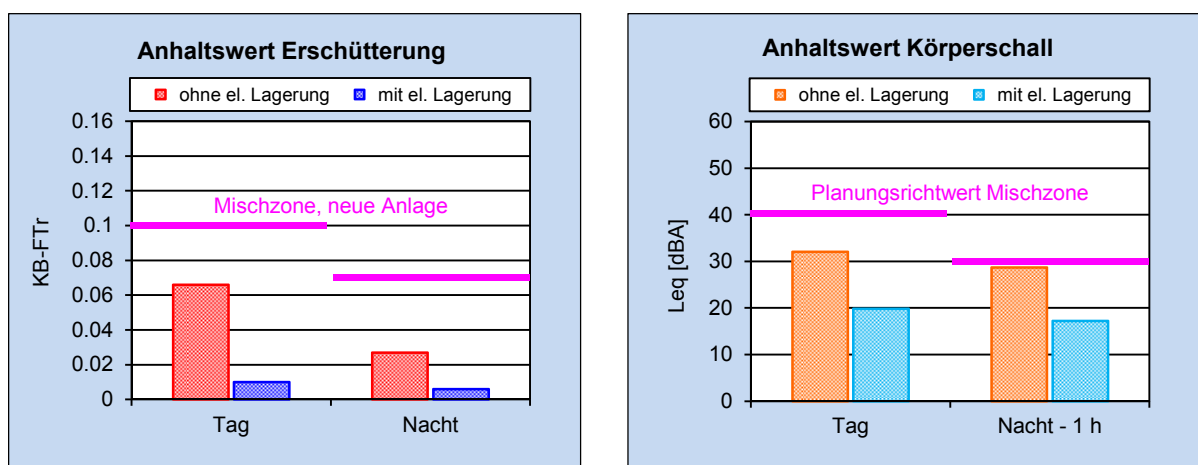


Bild 5.2 Vergleich mit den Richtwerten der BEKS für Erschütterungen und Körperschall

Bild 5.3 zeigt ein Transferspektrum für eine elastische Gebäudelagerung nach dem Einmassenschwinger-Modell (12 Hz Eigenfrequenz, 20% Dämpfung), welches für die Immissionsprognose für das Gebäude mit elastischer Lagerung verwendet wurde. Die damit prognostizierten Körperschallwerte waren kleiner als die nach der Fertigstellung des Gebäudes gemessenen Werte. Der Grund könnte bei den Körperschallanteilen bei höheren Frequenzen liegen, welche – ähnlich wie bei der Gebäudeankopplung (siehe Bild 4.2) – entgegen dem Einmassenschwinger-Modell nicht so stark weggedämpft werden. Demnach müsste das Transferspektrum bei den hohen Frequenzen eher konstant bleiben oder sogar leicht zunehmen als immer weiter abzunehmen. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich.

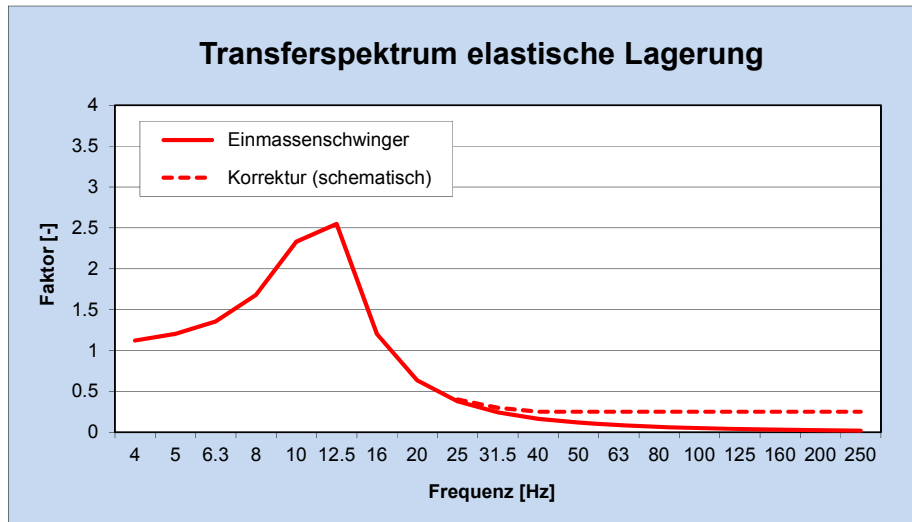


Bild 5.3 Transferspektrum einer elastischen Lagerung bei 12 Hz und 20 % Dämpfung

6 Umwandlung Erschütterung zu Körperschall

Bei der Umwandlung von Erschütterungen der Gebäudestruktur, insbesondere der Decken und Wände, in den durch Schienenverkehr verursachten, typischen Körperschall im eher tiefen Frequenzbereich gibt es nach wie vor viele unbekannte Einflüsse wie die Geometrie des Raums oder die Deckenart. Daher ist ein empirischer Ansatz sinnvoll. Dazu wurden 34 Messreihen in Räumen mit Holzdecken und 44 Messreihen in Räumen mit Betondecken ausgewertet. Bild 6.1 zeigt die gemittelten Transferspektren von der Erschütterung der Geschossdecke zu Schalldruck für Holz- und Betondecken. Demnach ist die Übertragung bei Betondecken besser als bei Holzdecken. Grund könnte die oftmals geringere Dämpfung bei Betondecken sein, wodurch diese auch in anderen Eigenformen als der Grundform ins Schwingen kommen kann, insbesondere bei höheren Frequenzen. Es ist jedoch anzumerken, dass die Streuung der einzelnen Messreihen relativ gross ist.

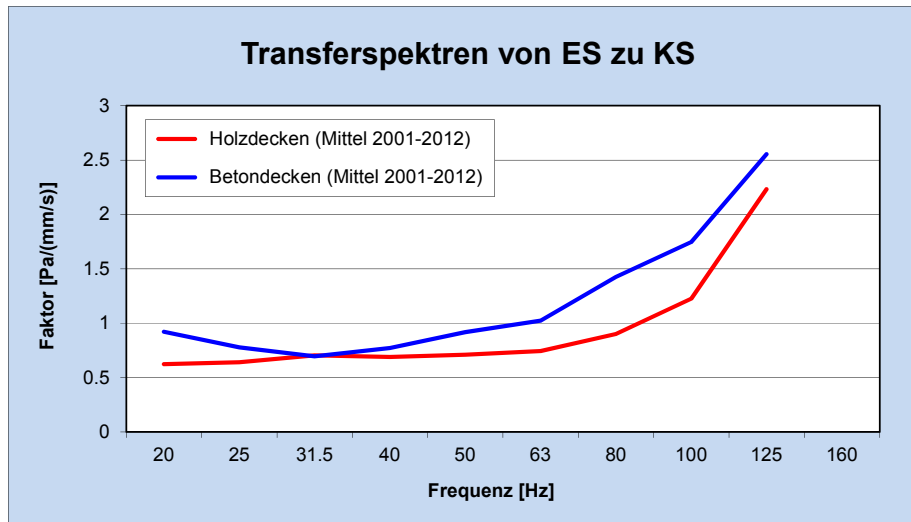


Bild 6.1 Transferspektren von Erschütterung zu Körperschall für Holz- und Betondecken

Zur gezielten Untersuchung der Abstrahlung von Körperschall durch Erschütterungen der Geschossdecke wurden Messungen in einem Wohngebäude durchgeführt. Hierzu wurde die Gebäudestruktur durch einen elektrodynamischen Erreger mit immer derselben Anregungsfunktion (Sweep, 20 bis 160 Hz, Dauer 60 s) in Schwingung versetzt. Gleichzeitig wurden die Erschütterungen der Geschossdecke und der Schalldruck im Raum gemessen. Der Einsatz des elektrodynamischen Erregers erlaubte es, die Amplituden der Anregungsfunktion zu variieren. Es wurden Messungen bei drei verschiedenen Amplituden durchgeführt: 0.5 V (elektrische Ausgangsspannung vor Verstärkung), 1 V und 2 V. Die aus den drei Messungen berechneten Transferspektren von Erschütterung zu Körperschall sind identisch (siehe Bild 6.2). Daraus lässt sich schliessen, dass sich im untersuchten Bereich ($v_{\max} = 0.21 - 0.79 \text{ mm/s}$, $v_{\text{rms}} = 0.08 - 0.29 \text{ mm/s}$) der abgestrahlte Schalldruck proportional zur Erschütterung der Geschossdecke verhält.

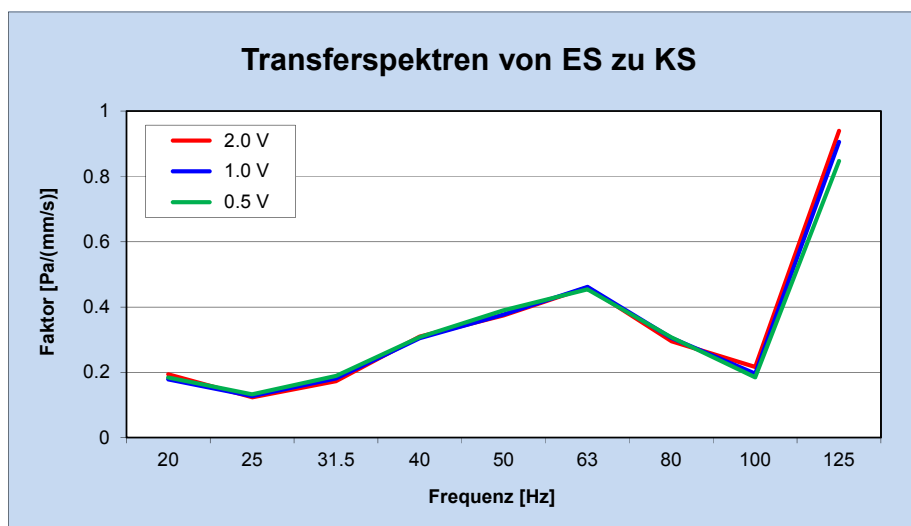


Bild 6.2 Transferspektren von Erschütterung zu Körperschall bei unterschiedlich starker Anregung

Dank der reproduzierbaren Anregung konnte auch der Einfluss der Sensorposition untersucht werden. Bild 6.3 zeigt als Beispiel zwei Transferspektren von Erschütterung zu Körperschall, wobei lediglich die Position des Mikrophons leicht verändert wurde. Dies zeigt, dass die Resultate stark von den gewählten Sensorpositionen abhängen. Grundsätzlich sollte weder auf der Geschossdecke (Erschütterungen) noch im Raum (Körperschall) an einem Knotenpunkt

der vorhandenen Schwingungsformen gemessen werden. Da sich aber bei Schienenverkehrsimmersionen verschiedene Frequenzen und somit auch verschiedene Schwingungsformen überlagern, gibt es „den perfekten“ Messpunkt nicht. Am ehesten eignet sich der Drittpunkt, da dort kein Knotenpunkt zu erwarten ist.

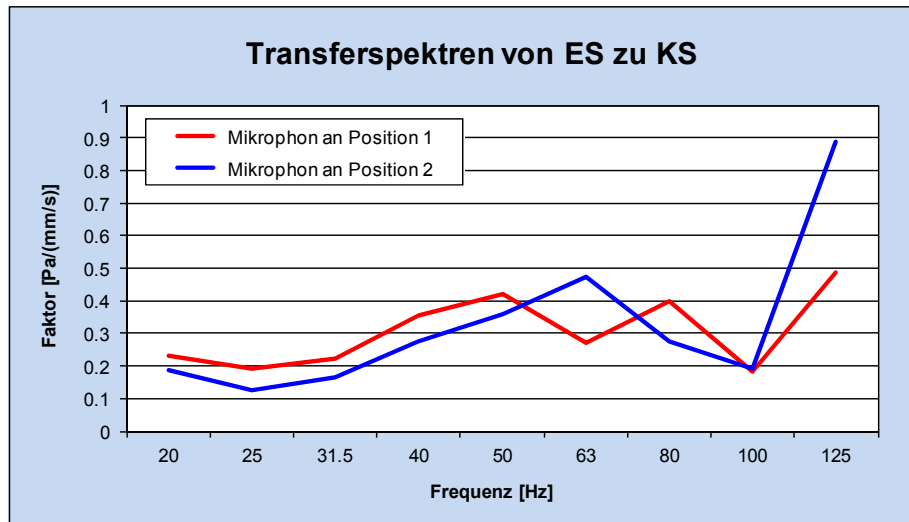


Bild 6.3 Transferspektren von Erschütterung zu Körperschall bei unterschiedlichen Mikrofon-Positionen

7 Schlussbemerkung

Mit Hilfe von empirischen Modellen wie dem VIBRA-1-2-3 lassen sich die Erschütterungsausbreitung durch Schienenverkehr von der Quelle bis zur Geschosdecke 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 Einbau einer Weiche verdoppelt in etwa die Erschütterungen bei einer Zugdurchfahrt. Eine Unterschottermatte vermag diese zusätzlichen Erschütterungen nicht kompensieren.
- Bei schweren Gebäuden werden tendenziell weniger Erschütterungen von aussen auf das Fundament übertragen als bei leichteren Bauten.
- Eine gut ausgeführte elastische Lagerung des Gebäudes kann die Immissionen stark reduzieren.

Die Beispiele – insbesondere bei der Umwandlung von Erschütterungen zu Körperschall – zeigen auch, dass trotz ähnlichen Bedingungen die Streuung zwischen einzelnen Messreihen gross ist und es somit die „Standardsituation“ nie geben wird. Auch können bestimmte Einflüsse nur in seltenen Fällen gezielt untersucht werden, da keine Laborbedingungen vorliegen. Darum ist es wichtig, die Erkenntnisse aus möglichst vielen Messungen fortlaufend zusammenzutragen und diese ins empirische Modell einfließen zu lassen.