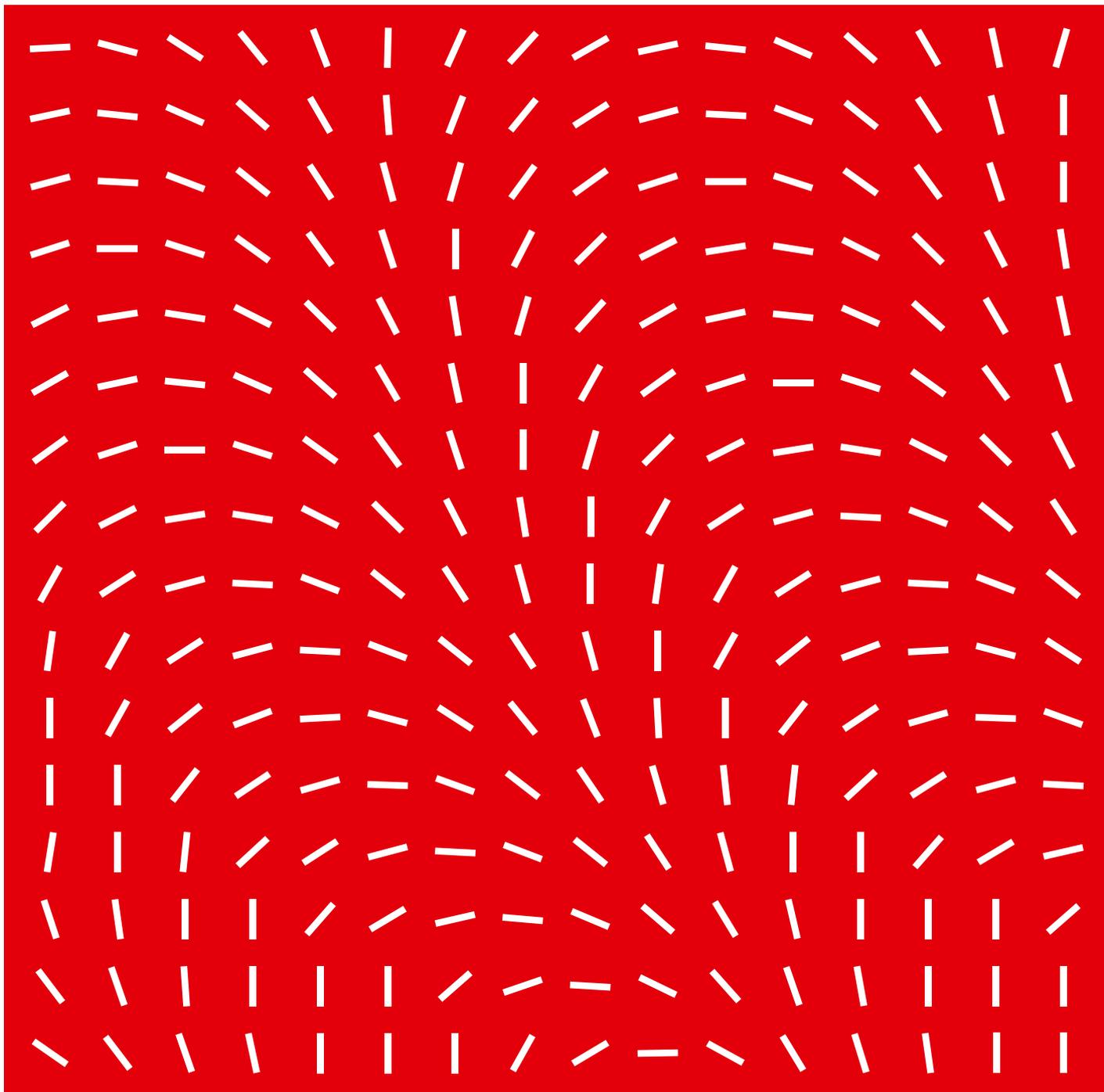


## Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr



# Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr

## 1 Einleitung

Eisenbahnen sind eine fantastische Erfindung. Als vor knapp 200 Jahren die ersten Eisenbahnstrecken gebaut wurden, war die Begeisterung grenzenlos. Erstmals konnten grosse Distanzen in unglaublich kurzer Zeit zurückgelegt werden und auch für den Gütertransport eröffneten sich ganz neue Möglichkeiten. Aber auch schon damals zeigten sich unangenehme Nebenerscheinungen: Pferdegespanne scheuten beim Anblick dieser ungewohnten, fauchenden Ungetüme und man befürchtete, dass die Getreidefelder durch Funkenwurf in Brand gesetzt werden könnten. Mittlerweile haben sich diese Ungetüme zu eleganten, stromlinienförmigen Hochgeschwindigkeitszügen entwickelt, an die sich alle gewöhnt haben und die wir alle gerne benutzen. Unangenehme Nebenerscheinungen sind allerdings geblieben und zwar vor allem in Form von Erschütterungen und Lärm.

Im vorliegenden Beitrag sollen die mit den Erschütterungen zusammenhängenden „Nebenerscheinungen“ näher beleuchtet werden. Dazu gehören die Erschütterungen selbst, die sich bei jeder Zugdurchfahrt als Vibrationen des Fussbodens bemerkbar machen, und der sekundär abgestrahlte Schall, der erst im Innern des Gebäudes durch die Vibration von Decken und Wänden entsteht und als tiefes Donnerrollen wahrgenommen wird, so als ob der Zug durch die Tiefgarage des Hauses fahren würde. Dieser sekundär abgestrahlte Schall, auch „Körperschall“ genannt, ist zu unterscheiden vom direkten Schall, der z.B. durch die Fenster ins Haus dringt.

In der Regel akzeptiert der Mensch die „störenden Nebeneffekte“ der Eisenbahn recht leicht. Da die Störung regelmässig auftritt, kann sie vom Hirn ausgeblendet werden, sodass wir sie nach einer gewissen Angewöhnungszeit gar nicht mehr bewusst wahrnehmen. Problematisch wird es, wenn die Störung eine gewisse Stärke oder eine gewisse Häufigkeit übersteigt. Dann kann sie nicht mehr ausgeblendet werden und kann zu einer erheblichen Beeinträchtigung des Wohnkomforts oder sogar der Gesundheit führen.

Für den Bauingenieur stellt sich die Problematik der Eisenbahnerschütterung 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 Immis-

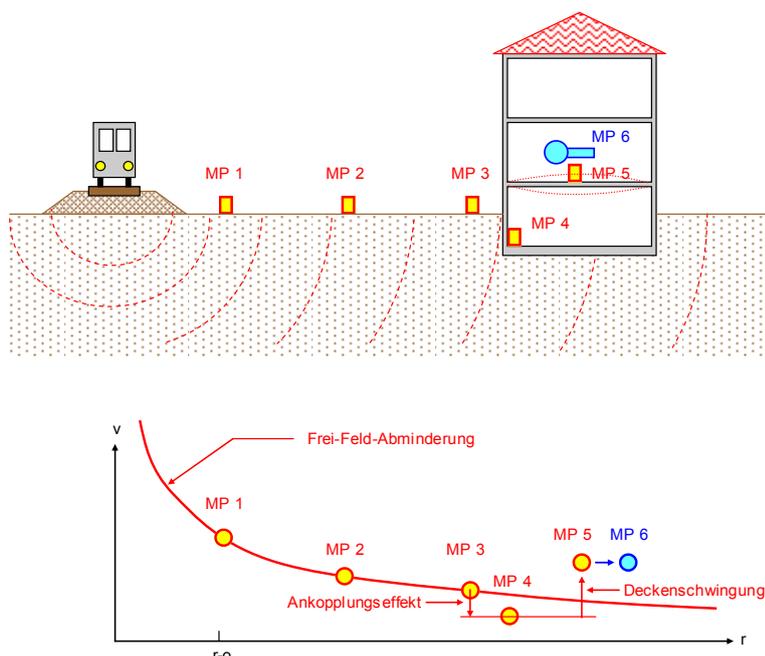
sionen innerhalb des von den Normen vorgesehenen Rahmens liegen. Gegebenenfalls sind Massnahmen zu entwickeln, um die Immissionen zu reduzieren.

In allen drei Fällen ist ein vertieftes Verständnis der Vorgänge bei der Ausbreitung der Erschütterungen die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Lösung. Überdies benötigen wir ein Rechenmodell, mit dem wir die komplexen Vorgänge der Erschütterungsausbreitung mit ausreichender Genauigkeit simulieren 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 Modelle wurden weiterentwickelt, um auch die sehr wichtige Frequenzabhängigkeit der Einflussfaktoren einbeziehen zu können. Dies führte zu den Terzspektren-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.

Im vorliegenden Beitrag sollen zwei empirische Verfahren für die Berechnung der Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr erläutert werden. Beim ersten handelt es sich um ein einfaches frequenz-unabhängiges Modell, beim zweiten um ein Terzspektren-Modell. Ausgehend vom Konzept dieser Modelle, werden die darin verwendeten mathematischen und physikalischen Zusammenhänge erläutert. Anschliessend wird gezeigt, wie die in den Modellen verwendeten Parameter, d.h. die Transferfaktoren und die Transferspektren, durch statistische Auswertung von Messdaten ermittelt werden können. Darnach werden die Ergebnisse der statistischen Auswertung von Messungen an über 150 Gebäuden neben Eisenbahnlinien, worin die Daten von ca. 30'000 Zugdurchfahrten enthalten sind, in Form von Diagrammen und Tabellen präsentiert. Den Abschluss bildet das Kapitel „Praktische Anwendungen“, in welchem die typischen Einsatzgebiete für diese Berechnungsverfahren und die Zuverlässigkeit der erstellten Prognosen dargestellt werden.

Bild 1.1 zeigt das Grundkonzept für das einfache empirische Modell. Mit einem Ansatz wie in Gleichung (Gl. 1.1) wird die Schwingungsgeschwindigkeit im Gebäude (beim MP 5) aufgrund der Schwingungsgeschwindigkeit neben dem Gleis (beim MP 1) berechnet.



**Bild 1.1** Konzept für das einfache empirische Modell

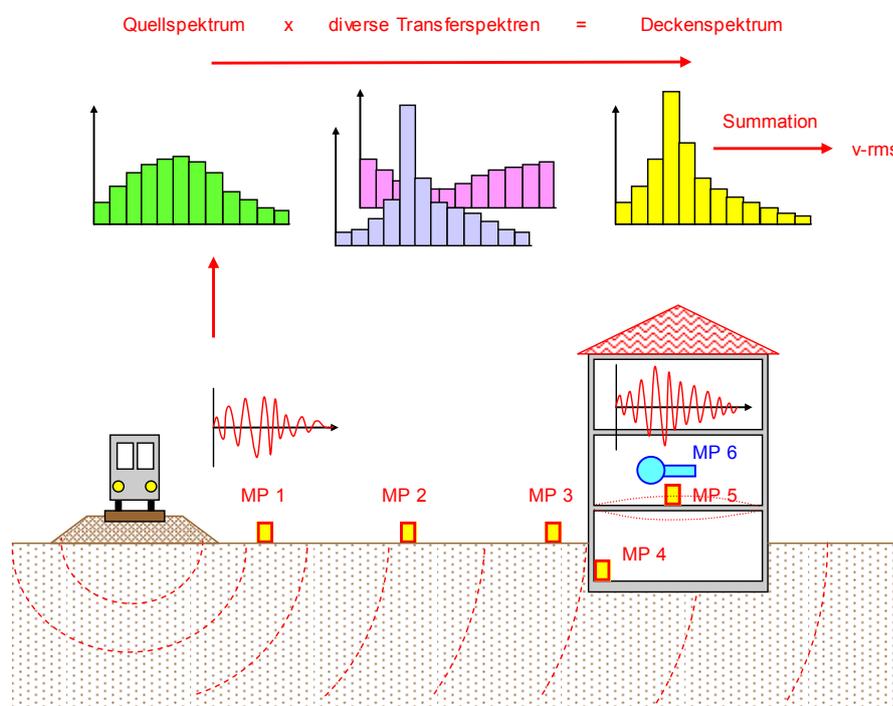
$$v = v_0 \cdot \left( \frac{r_0}{r} \right)^m F_a \cdot F_d \quad (\text{Gl. 1.1})$$

- v = Schwingung beim MP 5
- v<sub>0</sub> = Schwingung bei r<sub>0</sub>
- r<sub>0</sub> = Referenzdistanz
- r = Gebäuedistanz
- m = Abminderungsexponent
- F<sub>a</sub> = Ankopplungsfaktor
- F<sub>d</sub> = Deckenfaktor

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

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“ 10 Parameter benötigt, um eine einigermaßen zuverlässige Prognose für Erschütterung und Körperschall zu erreichen.

Bild 1.2 zeigt den Ablauf beim Terzspektralen-Modell. 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 Geschosdecke und je nach Situation auch die Einfügespektren für die Unterschottermatten oder für die elastische Lagerung des Gebäudes. Als Resultat erhalten wir das Terzbandspektrum für die Schwingung auf der Geschosdecke. Daraus können wir durch quadratische Summation der Terzbänder den RMS-Wert der Schwingungsgeschwindigkeit berechnen.



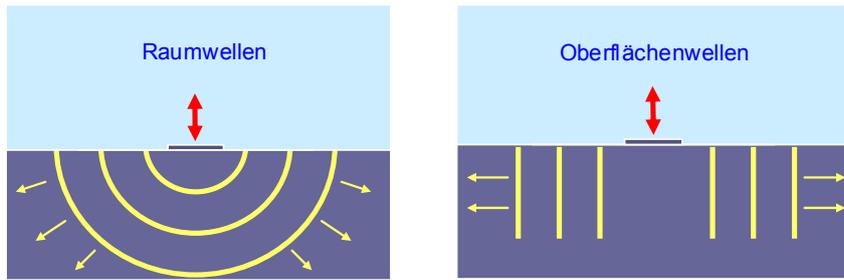
**Bild 1.2** Konzept für das Terzspektralen-Modell

Bevor wir nun näher auf diese beiden Modelle eintreten, wollen wir uns den physikalischen Grundlagen der Erschütterungsausbreitung zuwenden und uns die mathematischen Gesetzmäßigkeiten in Erinnerung rufen, die in diesen Modellen verwendet werden.

## 2 Grundlagen aus der Physik

### 2.1 Wellenausbreitung im Boden

Im idealen Halbraum entstehen durch eine harmonische Anregung an der Oberfläche – wie in Bild 2.1 dargestellt – zwei Arten von Wellen: Raumwellen, die sich halbkugelförmig in die Breite und Tiefe ausbreiten und Oberflächenwellen, die sich – ähnlich wie Wasserwellen – nur horizontal (mit beschränkter Tiefenwirkung) ausbreiten. Zur ersten Kategorie gehören die Kompressionswellen (P-Wellen) und die Scherwellen (S-Wellen), zur zweiten gehören die Raleigh-Wellen (R-Wellen).



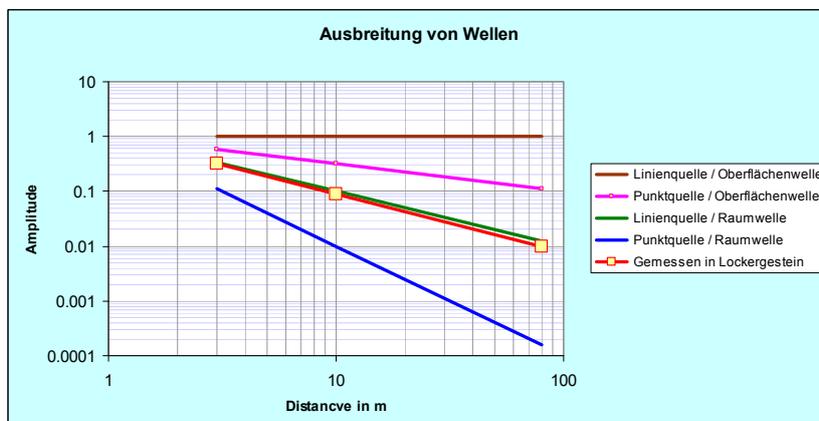
**Bild 2.1** Ausbreitung von Raumwellen und Oberflächenwellen

Aufgrund der Energieabnahme mit zunehmender Distanz von der Quelle kommt man zum Schluss, dass die Abnahme der Schwingungsamplituden den Gesetzen in Tabelle 2.1 gehorchen muss:

**Tabelle 2.1:** Ausbreitung im idealen Halbraum (nur geometrische Dämpfung)

Wellenart	Abminderung bei Punktquellen	Abminderung bei Linienquellen
Raumwelle an der Oberfläche	$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^2$	$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^1$
Oberflächenwelle	$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^{0.5}$	$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^0$

In Bild 2.2 ist die Abminderung dieser 4 Wellenarten graphisch dargestellt. Die stärkste Abnahme erfährt die Raumwelle einer Punktquelle, während die Oberflächenwelle bei einer Linienquelle unverändert fortwandert. Neben den theoretischen Gesetzmässigkeiten ist in Bild 2.2 auch die gemessene Erschütterungsabnahme von Eisenbahnerschütterungen eingezeichnet. Der Vergleich der gemessenen Abminderung mit der theoretischen Abminderung lässt vermuten, dass es sich bei der Eisenbahnerschütterung um eine Raumwelle einer Linienquelle handelt, die praktisch keine Materialdämpfung aufweist. Realistischer ist jedoch die Annahme einer Oberflächenwelle mit Materialdämpfung, die in Gleisnähe von einer Linienquelle verursacht wird und in grösseren Gleisdistanzen eher als Punktquelle zu betrachten ist. Eine eindeutige Zuordnung ist nicht möglich sein.



**Bild 2.2** Abminderung von Oberflächen- und Raumwellen an der Oberfläche

In den Gleichungen von Tabelle 2.1 ist erst die Amplitudenabnahme infolge der Vergrößerung des durch die Wellen beanspruchten Raumes, d.h. die geometrische Dämpfung, berücksichtigt. Die Amplitudenabnahme durch innere Reibung, die so genannte Materialdämpfung, muss zu-

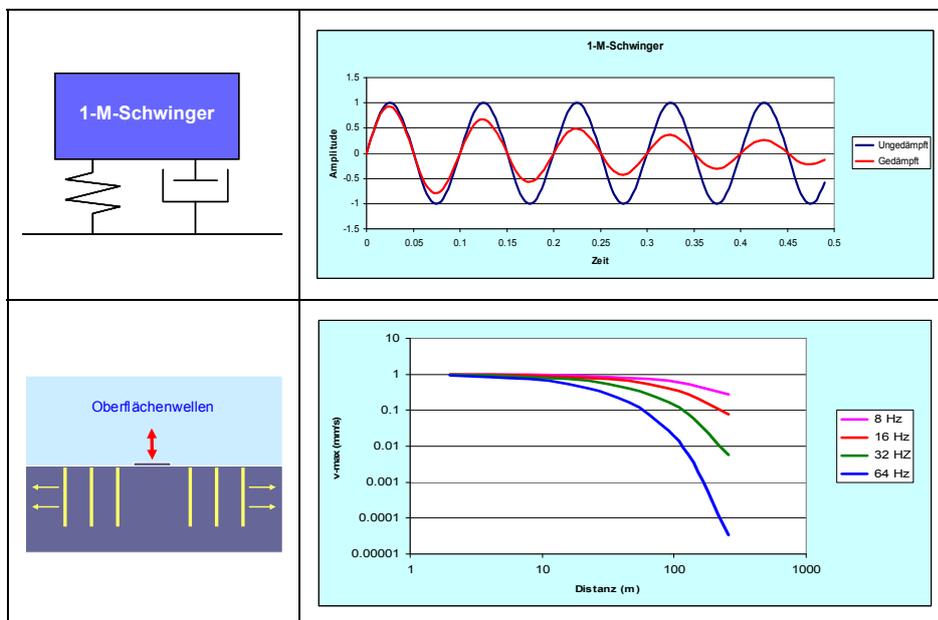
sätzlich eingeführt werden. Mit dem vom 1-Massen-Schwinger bekannten Ansatz für viskose Dämpfung

$$v = v_0 \sin 2\pi ft \cdot e^{-2\pi Dt} \tag{2.1}$$

erhalten wir durch entsprechende Umwandlung den Ansatz für die Abminderung im idealen Halbraum mit Materialdämpfung:

$$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^{n(f)} e^{\left( -\frac{2\pi D}{v_B} (r-r_0) \right)} \tag{2.2}$$

In Bild 2.3 sind die Abminderung beim viskos-gedämpften 1-M-Schwinger (gemäss (2.1)) und die Abminderung infolge viskoser Materialdämpfung beim Halbraum (gemäss (2.2)) graphisch dargestellt. Der Abnahme der Schwingung beim 1-M-Schwinger mit zunehmender Zeit entspricht die Abnahme der Wellen im Boden mit zunehmender Distanz. Und genauso wie ein 1-M-Schwinger mit höherer Frequenz rascher zur Ruhe kommt, klingen die höheren Frequenzen im Boden rascher ab.

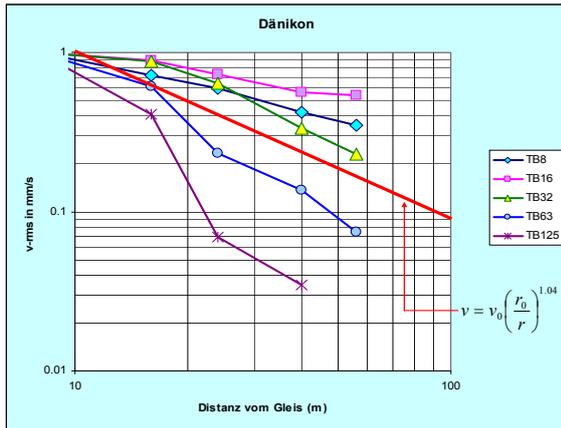


**Bild 2.3** Abminderung von Oberflächen- und Raumwellen

Anstelle des komplizierten Ausdrucks in Gleichung (2.2) kann auch die einfachere Form von Gleichung (2.3) verwendet werden, um die Abminderung im Boden zu beschreiben. Dabei werden beide Anteile, die geometrische Dämpfung und die Materialdämpfung, durch einen einzigen Parameter erfasst. Dies ist schon deshalb gerechtfertigt, weil die drei freien Parameter in Gl. 2.2 nicht unabhängig voneinander bestimmt werden können.

$$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^{n(f)} \tag{2.3}$$

Bild 2.4 zeigt die starke Frequenz-Abhängigkeit der Wellenausbreitung am Beispiel einer Messung neben einer Eisenbahnlinie. Der Exponent n in Gleichung (2.3) ist frequenz-abhängig und variiert zwischen 0.31 und 2.17. Der für den Peak-Wert bestimmte Exponent von n = 1.04 liegt erwartungsgemäss im Mittelfeld der frequenz-abhängigen Exponenten.



Freq. Hz	n(f)
8	0.54
16	0.31
32	0.76
64	1.34
128	2.17

Bild 2.4 Frequenz-abhängige Ausbreitung im realen Boden

## 2.2 Ankopplung

Beim Übergang vom Baugrund auf das Gebäude werden die Erschütterungen in der Regel abgemindert. Einen guten Einblick in das als „Ankopplungseffekt“ bezeichnete Phänomen gibt uns das üblicherweise für Maschinenfundamente angewendete 1-Massen-Schwinger-Modell auf einem idealen Halbraum. Der Boden wird dabei als ein Feder-Dämpfungselement modelliert, dessen Steifigkeit und Dämpfung sich aus den Boden-Kennwerten, der Grundfläche des Fundamentes und der Masse berechnet.

Wie in Bild 2.5 dargestellt, lässt sich ein Einfamilienhaus oder ein Mehrfamilienhaus mit den angegebenen Werten als starrer Block auf einem Halbraum modellieren.

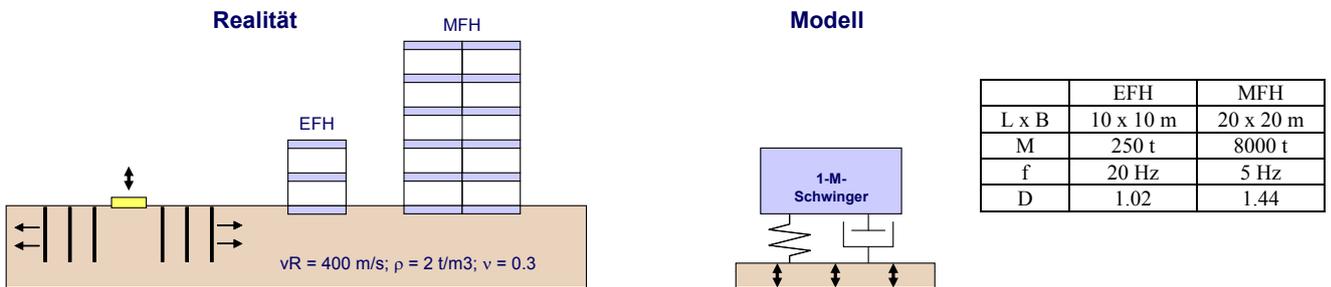


Bild 2.5 Modellierung eines Gebäudes als 1-M-Schwinger zur Bestimmung des Ankopplungsfaktors

Die Schwingungen, die vom Baugrund auf das Gebäude übertragen werden, lassen sich mit der Übertragungsfunktion für den 1-Massen-Schwinger berechnen und in Funktion der Frequenz darstellen (Bild 2.6).

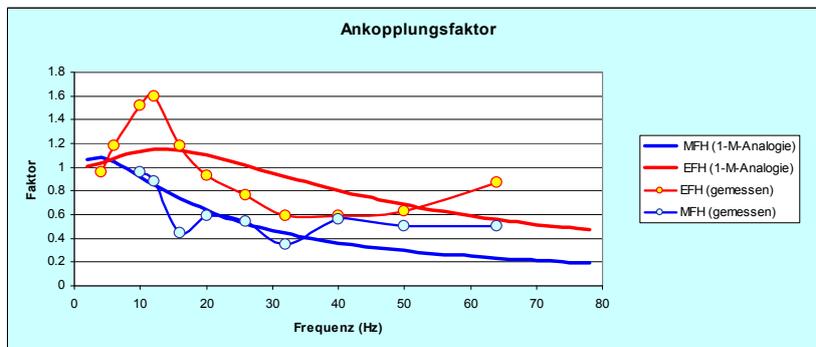


Bild 2.6 Vergleich der Transferfunktion aus der 1-M-Analogie mit der empirisch ermittelten Ankopplungsfunktion

In Bild 2.6 erkennen wir eine gute Übereinstimmung zwischen der 1-M-Schwinger-Analogie und der empirisch ermittelten Ankopplungsfunktion. Der Vergleich liefert auch die Erklärung für die Verstärkung, die man bei Einfamilienhäusern bei den tiefen Frequenzen beobachtet: Es han-

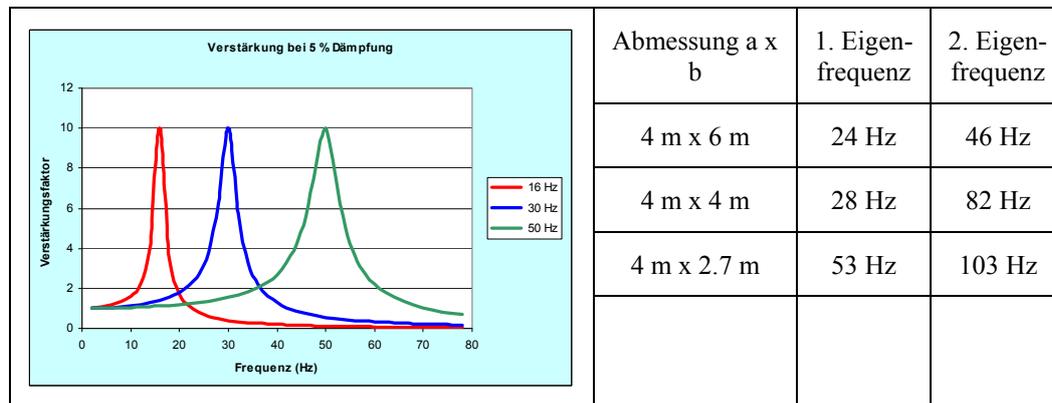
delt sich um eine Resonanz-Erscheinung. Bei Mehrfamilienhäusern tritt dieses Phänomen kaum auf, da die Resonanzfrequenz viel tiefer liegt.

### 2.3 Deckenschwingung

Das Schwingverhalten der Geschossdecke bildet zumeist den wichtigsten Einflussfaktor in der gesamten Übertragungskette. Eine Geschossdecke kann in erster Näherung gut als 1-Massen-Schwinger modelliert werden. Die Eigenfrequenz einer Betondecke ergibt sich aus der Plattengleichung:

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \left[ \frac{Eh^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \tag{2.4}$$

Für eine typische Geschossdecke im Wohnungsbau mit  $h = 0.18$  m und aufgelegten Plattenrändern ergeben sich, wie in Bild 2.7 dargestellt, Grundfrequenzen zwischen 20 und 50 Hz und erste Oberfrequenzen zwischen 50 und 100 Hz: Die Verstärkung lässt sich aus den Resonanzkurven des 1-M-Schwingers ablesen. Bei 5 % Dämpfung ergibt sich bei der Resonanzfrequenz ein Verstärkungsfaktor 10.



**Bild 2.7.** Eigenfrequenzen bei typischen Decken im Wohnungsbau

Es ist zu beachten, dass diese Verstärkung nur in einem eng begrenzten Frequenzbereich auftritt. Bezogen auf die gesamte Erschütterung liegt der Verstärkungsfaktor natürlich wesentlich tiefer. Bei Betondecken liegt die Verstärkung in der Regel zwischen 2 und 4 und bei Holzdecken zwischen 3 und 6.

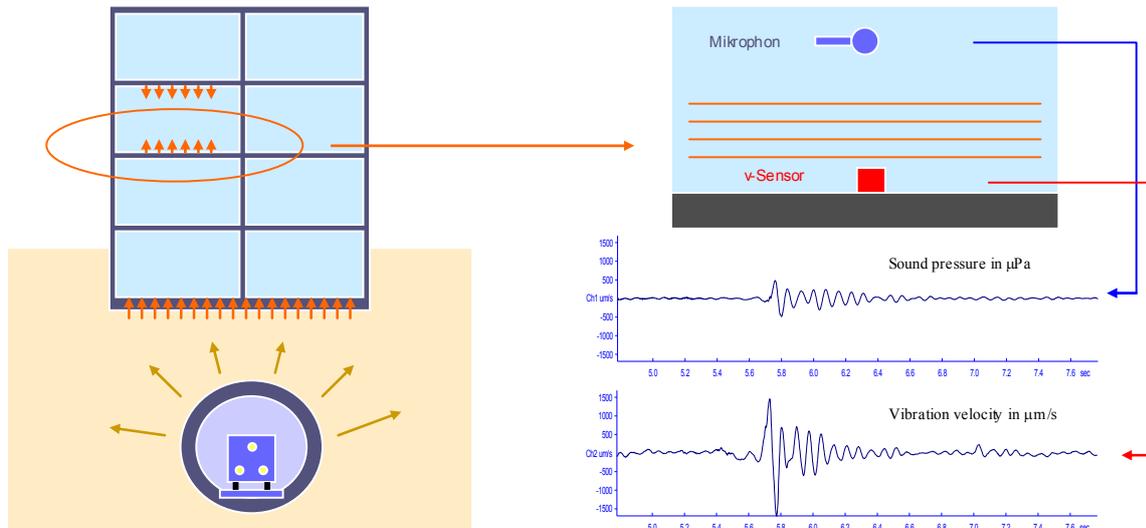
### 2.4 Körperschall

Der sekundäre, abgestrahlte Schall (oder Körperschall) wird durch die Schwingungen des Fussbodens, der Decke und der Wände erzeugt. Die vertikale Bewegung des Fussbodens erzeugt eine Druckwelle im Luftraum über dem Fussboden, welche – falls sie im hörbaren Frequenzbereich liegt – als Schall wahrgenommen wird.

Wie in Bild 2.8 (links) dargestellt, verursacht der im Tunnel fahrende Zug Vibrationen im Erdreich, die sich auf das Gebäude übertragen und von den Geschossdecken verstärkt werden. Ein Beobachter im Freien vor dem Gebäude wird von der Durchfahrt des Zuges nichts hören. In einem Raum im Gebäude hingegen wird er die Durchfahrt des Zuges als mehr oder weniger lautes Dröhnen erleben.

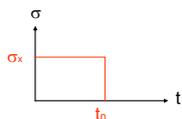
Mit einem einfachen Experiment lässt sich das Phänomen des abgestrahlten Schalls veranschaulichen: Wir stellen ein Geophon auf den Fussboden und ein Mikrophon in Raummitte und hüpfen kurz. Wie in Bild 2.8 rechts dargestellt, werden wir das Signal der Erschütterung und mit einer gewissen Verzögerung das Signal des Schalldruckes aufzeichnen können. Das Verhältnis

der beiden Grössen liegt in unserem Experiment bei 160  $\mu\text{m/s}$  zu 60  $\mu\text{Pa}$ , d.h. bei ca. 0.4 Pa/(mm/s).

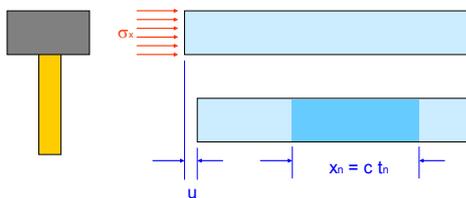


**Bild 2.8** Sekundärer, abgestrahlter Schall in einem Gebäude über einem Tunnel

Dieses Phänomen ist an sich nichts anderes als die Wellenausbreitung in einem Stab, der durch einen Impuls angeregt wird, wie in Bild 2.9 dargestellt. Der Impuls mit einer Dauer  $t_n$  und einer Spannung  $\sigma_x$  erzeugt eine komprimierte Zone der Länge  $x_n$  welche mit einer Geschwindigkeit  $c$  wandert. Die Verschiebung  $u$  ist durch Gl (2.5) gegeben und dies kann umgewandelt werden in Gl. (2.6) und Gl. (2.7).



$$u = \frac{\sigma_x}{E} x_n = \frac{\sigma_x}{E} v_c t_n \quad (2.5)$$



$$\frac{u}{t_n} = \frac{\sigma_x v_c}{E} \quad (2.6)$$

$$v = \frac{\sigma_x v_c}{E} \quad (2.7)$$

**Bild 2.9** Druckwelle in einem Stab

Mit  $E = \rho v_c^2$  in Gl. (2.7) erhalten wir die Beziehung zwischen der aufgebrachtten Spannung, welche auch den Druck in der komprimierten Zone darstellt, und der Partikelgeschwindigkeit:

$$\sigma_x = v \cdot \rho \cdot v_c \quad (2.8)$$

Mit  $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$  und  $v_c = 333 \text{ m/s}$  erhalten:

$$p \equiv \sigma_x = 0.4 \cdot v \cdot \text{Pa} \cdot \frac{1}{\text{mm/s}} \quad (2.9)$$

Dies bedeutet, dass – aufgrund der Theorie der Kompressionswellen im Stab – der Druck in der Luft über dem Fussboden aus der Schwinggeschwindigkeit des Bodens berechnet werden kann. Überdies gilt für normale Bedingungen ( $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$  und  $v_c = 333 \text{ m/s}$ ), dass der Druck (ausgedrückt in Pa) zahlenmässig 40 % der Schwinggeschwindigkeit des Bodens (ausgedrückt in mm/s) entspricht.

Zahlreiche Untersuchungen zur Berechnung des Körperschalls empfehlen für die Berechnung des Körperschalls, die Schwinggeschwindigkeit des Bodens in dB umzuwandeln und 6 bis 10 dB zu addieren. Dies entspricht an sich der Korrelation:

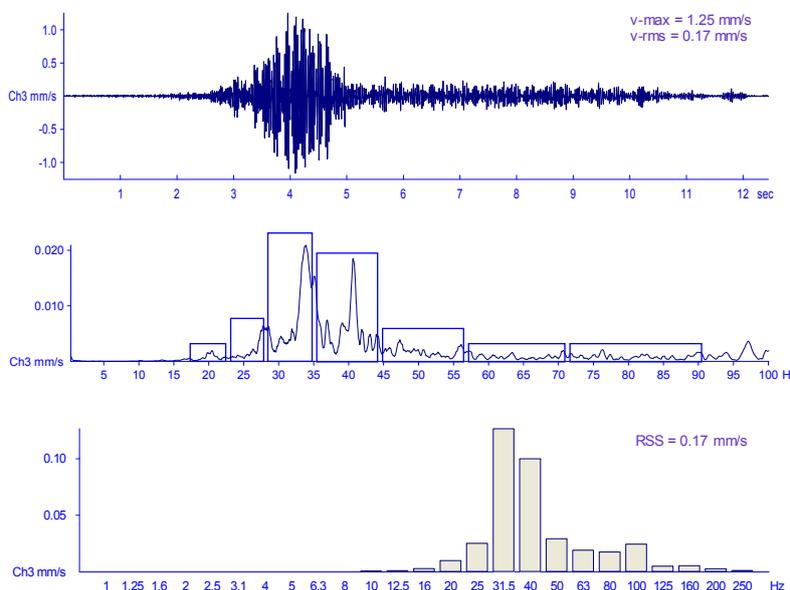
$$p = 0.8 \cdot 1.2 \cdot v \cdot Pa \cdot \frac{1}{mm/s} \tag{2.10}$$

d.h. der effektive abgestrahlte Körperschall ist 2- bis 3-mal höher als der in Gl. 2.9 angegebene theoretische Wert. Dies lässt sich dadurch erklären, dass nicht nur der Boden sondern auch die Wände und die Decke einen Beitrag an den Körperschall leisten.

### 2.5 Terzbandspektren

Wie im Einführungskapitel bereits angedeutet, verwendet das Terzspektren-Modell als Ausgangsgrösse ein Quellspektrum in Form eines Terzbandspektrums und berechnet die Zielgrösse, d.h. die Schwingung des Fussbodens, durch Multiplikation des Quellspektrums mit verschiedenen Transferspektren. Dabei stellt sich natürlich die Frage, ob dieses Vorgehen mathematisch korrekt ist, bzw. welche Vereinfachungen dabei eingeführt werden.

Bild 2.10 versucht den Zusammenhang zwischen dem Zeitsignal einer Erschütterungsaufzeichnung und dem Terzbandspektrum darzustellen. Die Aufzeichnung der Zugdurchfahrt in Bild 2.10 oben weist einen Peak-Wert von 1.25 mm/s und einen RMS-Wert von 0.17 mm/s auf. Mittels Fourier-Transformation erhalten wir das Amplitudenspektrum in Bild 2.10 mitte. Dieses Amplitudenspektrum, das ja aus tausenden von Stützstellen zusammengesetzt ist, lässt sich diskretisieren, indem einzelne Frequenzbänder zusammengefasst werden. So entspricht z.B. das Terzband mit der Mittenfrequenz von 31.5 Hz dem Frequenzbereich zwischen 28 und 35 Hz.



**Bild 2.10**

Zusammenhang zwischen dem RMS-Wert des Zeitsignals und dem RSS-Wert des Terzbandspektrums.

oben: Zeitsignal  
mitte: Amplitudenspektrum  
unten Terzbandspektrum

Freq.	Terzwert
20	0.01004
25	0.02516
32	0.12640
40	0.09998
50	0.02926
62	0.01911
80	0.01752
100	0.02452

RSS = 0.16981

Pro memoria: RMS = Root Mean Square = Wurzel aus dem Mittelwert aller Quadrate  
RSS = Root of the Sum of the Squares = Wurzel aus der Summe der Quadrate

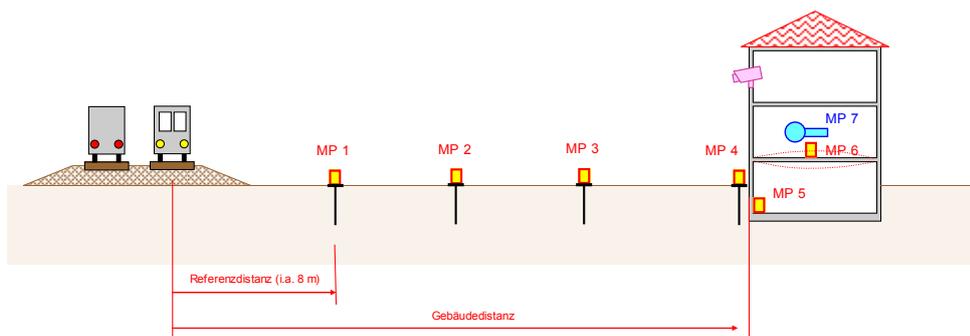
Der für uns interessante Aspekt der Terzband-Darstellung liegt darin, dass der RSS-Wert des Terzbandes, dem RMS-Wert des Signals entspricht. d.h. die Wurzel aus der Summe der Quadrate der Terzbandwerte ist gleich der Wurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Signalwerte (= Effektivwert des Signals).

Für unser Terzspektren-Modell bedeutet dies Folgendes: Gelingt es uns ein „korrektes Quellspektrum“ zu definieren und multiplizieren wir dieses mit „korrekten“ Transferspektren, so erhalten wir zwar nicht den korrekten Erschütterungszeitverlauf aber doch den „korrekten“ RMS-

Wert des Erschütterungszeitverlaufs. Aufgrund dieses RMS-Wertes können wir dann weitere charakteristische Grössen wie Peak-Wert, KB-Wert usf. berechnen, wobei wir annehmen, dass die Verhältnisse zwischen diesen charakteristischen Grössen im Gebäude gleich sind wie an der Quelle, d.h. im Frei-Feld neben dem Gleis.

### 3 Messungen als Grundlage für die Prognose

Als Grundlage für die Erschütterungsprognose eignet sich ein Mess-System bestehend aus mehreren Schwinggeschwindigkeits-Sensoren, einem Schalldruckaufnehmer und einer Videokamera. Damit lassen sich alle relevanten Informationen zeitgleich erfassen. Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer haben gegenüber Beschleunigungsaufnehmer den Vorteil der hohen Auflösung im tieferen Frequenzbereich. In den meisten Fällen kann man sich auf die Messung der Vertikal-schwingung beschränken, da nur diese – wegen der Verstärkung durch die Geschossdecken – von Bedeutung ist. Durch die zeitgleiche Erfassung des Erschütterungs- und des Schalldrucksignals erhalten wir die Korrelation zwischen Erschütterung und Körperschall. Mit der Videokamera, die ebenfalls durch den Trigger des Erschütterungssensors gesteuert ist, werden Zugtyp, Gleisbelegung und Fahrgeschwindigkeit erfasst.



**Bild 3.1a** Anordnung der Aufnehmer im Schnitt



**Bild 3.1b** Anordnung der Aufnehmer im Grundriss

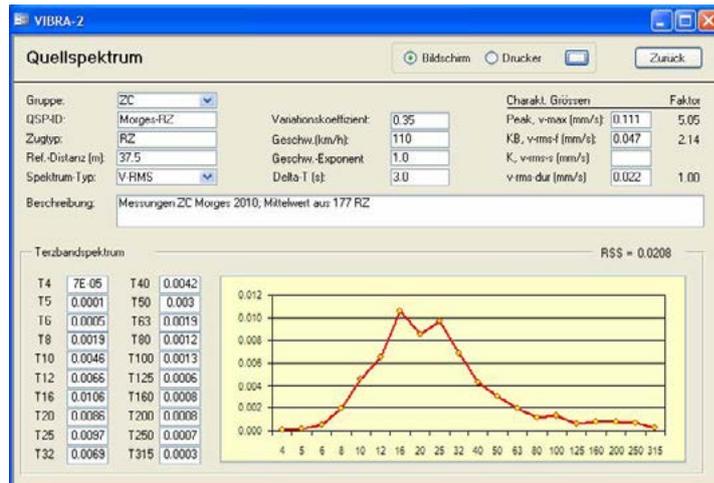
#### 3.1 Messkonzept

Bild 3.1 zeigt eine typische Mess-Konfiguration. Die Aufnehmer MP 1 bis MP 4 sind auf Messpfosten montiert und erfassen die Frei-Feld-Erschütterung. Es ist wichtig, dass diese Messreihe nicht vor dem Gebäude sondern neben dem Gebäude angeordnet wird, damit die Messung nicht durch die Wellenreflexion an der Gebäudefront verfälscht werden. Mit MP 5 wird die Erschütterung des Gebäudefundamentes und mit MP 6 die Erschütterung auf der Geschossdecke erfasst. Der Schallaufnehmer sollte in einem vom Gleis abgewandten Raum platziert werden, damit der

Anteil des Direktschalls möglichst gering ist. Auf diese Weise lassen sich die Quellspektren für die verschiedenen Zugtypen, alle Transferspektren und die Immissionen im Gebäude erfassen.

### 3.2 Datenauswertung

Art und Umfang der Datenauswertung hängt natürlich sehr stark von der Problemstellung ab. Bei der Beurteilung der Immissionen in einem bestehenden Gebäude ist das Schwergewicht auf die normenkonforme Auswertung der Messdaten im Gebäude zu legen. Für eine Immissionsprognose hingegen wird man mehr Aufwand für die Definition der Quell- und Transferspektren einsetzen. In Bild 3.2 ist die Eingabemaske für das Quellspektrum im Programm VIBRA-2 dargestellt.

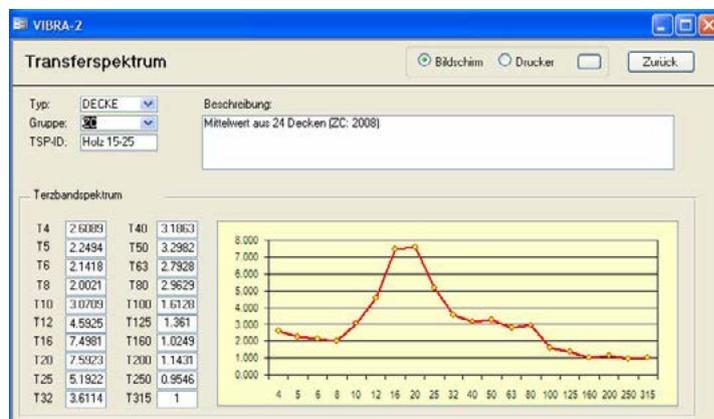


**Bild 3.2** Formular zur Erfassung eines Quellspektrums im Programm VIBRA-2

Parameter	Erläuterung
Spektrum-Typ:	In der Regel: RMS-konform
Ref.-Distanz.:	Distanz des Sensors vom Gleis
Variationskoeff.:	Streuung der Messdaten
Geschwindigkeit:	Fahrgeschwindigkeit des Zuges
Delta-T:	Vor- und Nachlauf des Signals
v <sub>max</sub>	Peak-Wert
KB:	KB-Wert nach DIN-Norm
K:	K-Wert nach Oe-Norm
v <sub>rms</sub>	RMS-Wert des Signals
Terz-Spektrum:	20 Terzband-Werte
RSS-Wert:	RSS-Wert des Terzspektrums

Das Quellspektrum wird als Mittelwert aus einer genügend grossen Anzahl von Zugsdurchfahrten berechnet. Die Definition des Quellspektrums umfasst jedoch nicht nur die 20 Terzbandwerte, die in der Figur von Bild 3.2 als Spektrum dargestellt sind sondern einen ganzen Satz von Parametern, die für die Berechnung der Immissionen im Gebäude ganz essentiell sind. So wird z.B. der Variationskoeffizient für die Berechnung der 90-Perzentile benötigt und der Faktor zwischen KB und v<sub>rms</sub> zur Berechnung des KB<sub>Ftr</sub>-Wertes nach DIN-4150/2. Der RSS-Wert des Terzbandspektrums schliesslich eignet sich als Kontrolle, denn dieser Wert sollte theoretisch gleich sein wie der RMS-Wert des Signals.

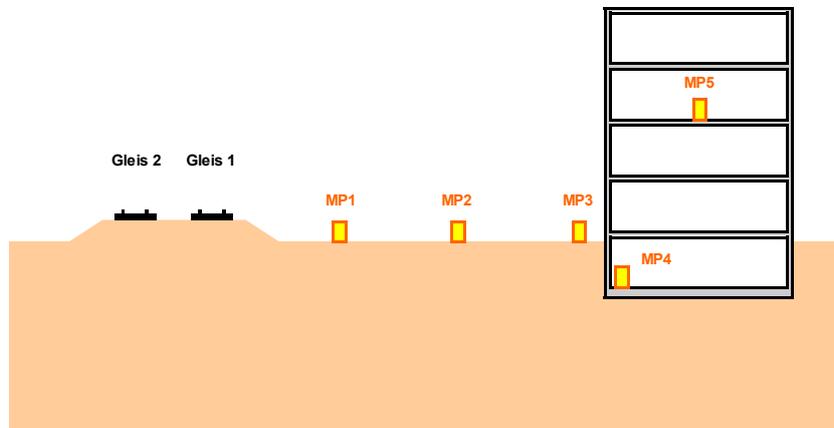
Die Transferspektren werden durch Division der entsprechenden Terzbandspektren gewonnen und gemittelt. Sie stellen – wie die Quellspektren – den Mittelwert aus einer grossen Anzahl von Messungen dar. Zusätzliche Parameter wie beim Quellspektrum werden nicht benötigt.



**Bild 3.3** Formular zur Erfassung eines Transferspektrums im Programm VIBRA-2

### 3.3 Die Datenbank VIBRA-3

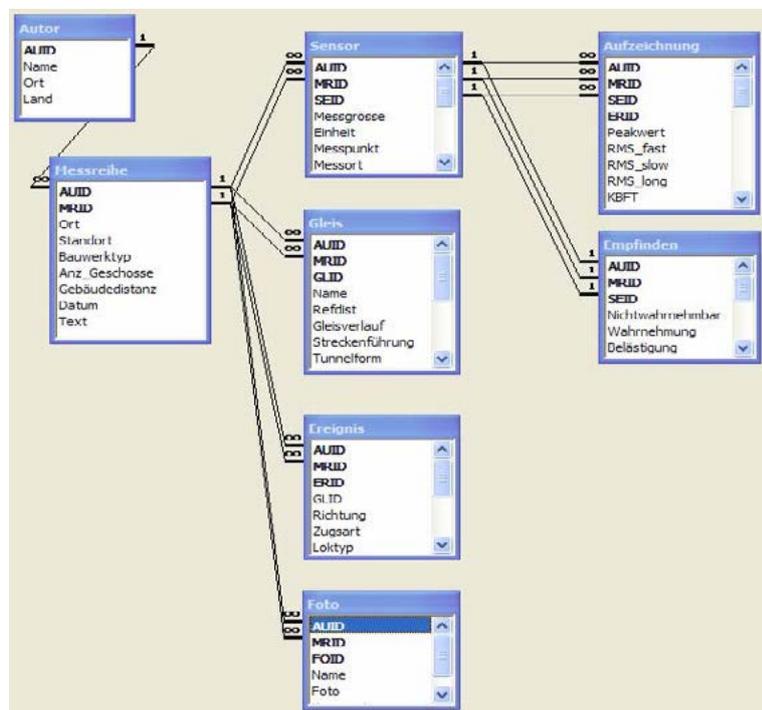
Die Datenbank in VIBRA-3 geht davon aus, dass die Messungen für Erschütterungs- und Körperschallimmissionen nach dem in Bild 3.4 gezeigten Schema vorgenommen werden, wobei die Anzahl der Sensoren ohne weiteres variieren kann.



**Bild 3.4** Schematische Darstellung einer Messreihe für VIBRA-3

Das Grundelement ist stets eine Messreihe quer zur Eisenbahnlinie, welche mehrere Sensoren umfasst. Bei den Sensoren kann es sich um Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- oder Schalldrucksensoren handeln. Die Sensoren registrieren die Erschütterungen bzw. den Schalldruck während der Zugvorbeifahrten. Eine Zugvorbeifahrt wird als Ereignis definiert und mit den zugehörigen Informationen wie Zugtyp, Fahrgeschwindigkeit etc. abgespeichert.

Die von den Sensoren während einer Zugvorbeifahrt aufgezeichneten Signale werden nicht direkt in VIBRA-3 abgespeichert, sondern müssen vorgängig ausgewertet werden. In VIBRA-3 werden nur die charakteristischen Grössen dieser Signale (Peakwerte, Effektivwerte etc.) und die Terzbandwerte aufgenommen.



**Bild 3.5** Schematische Darstellung der Datenbankstruktur in VIBRA-3

Dieses Diagramm ist folgendermassen zu interpretieren: Die Messreihe eines Autors umfasst mehrere Sensoren und jeder Sensor macht mehrere Aufzeichnungen. Zusätzlich kann das subjektive Empfinden am Standort jedes Sensors erfasst werden. Zu jeder Messreihe gehören ein oder mehrere Gleise. Mit einer Messreihe werden mehrere Ereignisse (Zugdurchfahrten) erfasst.

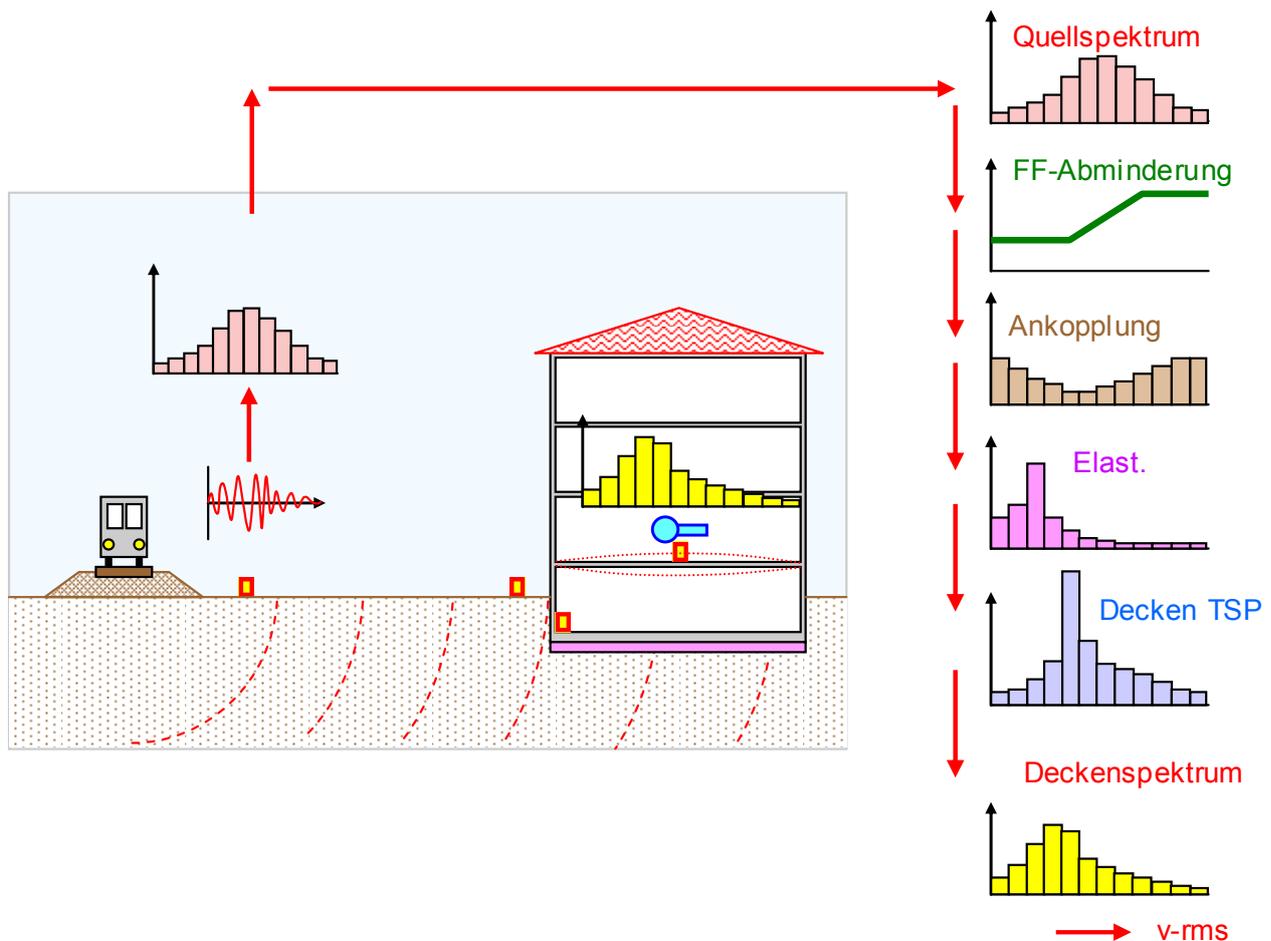
Für den vorliegenden Beitrag wurden die von Ziegler Consultants durchgeführten Messungen im Zeitraum von 2001 bis 2010 ausgewertet. Gesamthaft standen 150 Messreihen mit über 30'000 Zugdurchfahrten zur Verfügung.

## 4 Das Terzspektren-Modell

Von den beiden hier zur Diskussion stehenden Modellen ist das Terzspektrenmodell im Hinblick auf die Systematik das korrektere. Aus diesem Grunde ist es auch leichter zu verstehen und soll deshalb als erstes behandelt werden. Das Faktoren-Modell ist im Grunde genommen eine Reduktion des Terzspektren-Modells auf ein Minimum. Viele Konzepte, die im Terzspektrenmodell explizit vorhanden sind existieren im Faktorenmodell implizit d.h. in versteckter Form.

### 4.1 Berechnungsablauf

Bild 4.1 veranschaulicht den Rechenvorgang beim Terzspektren-Modell. Aus den im Frei-Feld neben dem Gleis gemessenen Erschütterungssignalen wird ein gemitteltetes Terzbandspektrum gebildet, das für unsere Berechnung als Quellspektrum dienen soll. Die Abminderung im Frei-Feld zwischen dem Gleis und dem Gebäude wird durch die Gleichung (2.2) oder (2.3) beschrieben mit einem frequenz-abhängigen Exponenten. Der Ankopplungseffekt bewirkt, dass die mittleren Frequenzen abgeschwächt werden, was durch das Ankopplungstransferspektrum berücksichtigt wird. Die elastische Lagerung des Gebäudes ergibt eine Reduktion in den höheren Frequenzen und eine Verstärkung in der Eigenfrequenz. Dies wird durch das Transferspektrum für die elastische Lagerung erfasst. Die Eigenschwingung der Geschossdecke wiederum bewirkt eine Verstärkung im mittleren Frequenzbereich.



**Bild 4.1** Berechnungsablauf beim Terzspektren-Modell

So erhalten wir durch Multiplikation des Quellspektrums mit allen erforderlichen Transferspektren das gesuchte Deckenspektrum. Damit haben wir zwar noch nicht das Erschütterungssignal auf der Geschossdecke aber wir können den RSS-Wert des Deckenspektrums bilden, der wiederum dem RMS-Wert des Erschütterungssignals entspricht. Aufgrund des RMS-Wertes können wir die gesuchten charakteristischen Größen wie  $v_{max}$ ,  $KB_{Ftr}$  oder K-Wert berechnen.

Das gewählte Vorgehen ist bis zur Berechnung des RMS-Wertes mathematisch exakt. Die Berechnung der übrigen charakteristischen Grössen wie  $v_{\max}$ ,  $KB_{\text{Ftr}}$  oder K-Wert ist allerdings eine Approximation. Sie basiert auf der Annahme, dass die Korrelationen zwischen den charakteristischen Grössen, wie wir sie neben dem Gleis bestimmen, auch im Gebäude gelten. Umfangreiche statistische Untersuchungen zeigen, dass der hier eingeführte Fehler im Bereich von 5 bis 10 % liegt und somit neben den übrigen Unsicherheiten nicht ins Gewicht fällt.

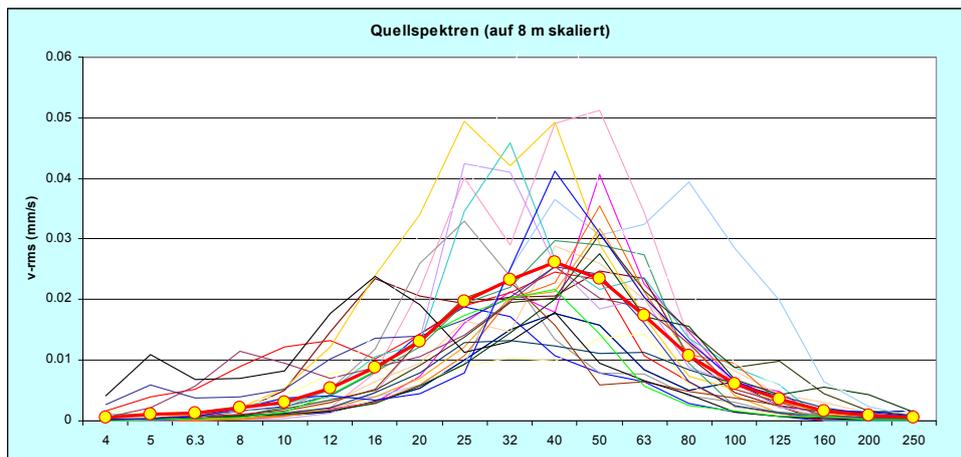
Um nun auch noch den Körperschall zu berechnen, wird das Verfahren weitergeführt mit einem Transferspektrum zwischen der Erschütterung auf der Geschossdecke und dem Schalldruck im Raum. Dieses Transferspektrum stellt die Beziehung her zwischen der Schwinggeschwindigkeit und dem Schalldruck und hat die Einheiten Pa / (mm/s). Wir erhalten auf diese Weise das unbewertete Schalldruck-Spektrum und können – mit Hilfe der A-Bewertung und der Summation der einzelnen Terzbänder – den bewerteten Schallpegel bestimmen.

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.

## 4.2 Quell- und Transferspektren

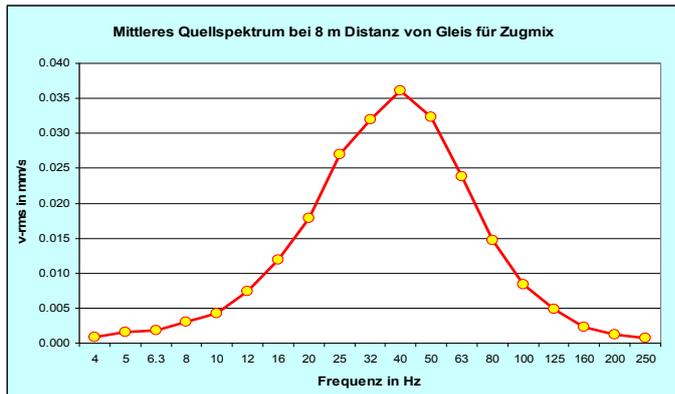
### 4.2.1 Quellspektren

Quellspektren weisen eine sehr grosse Variabilität auf. Wie man aus den Beispielen in Bild 4.2 entnehmen kann, sind sowohl in der Stärke als auch in der Spektralverteilung sehr grosse Unterschiede vorhanden. Es wird kaum möglich sein, allgemeingültige „Standard-Spektren“ zu entwickeln. In der Regel ist es ohnehin vorteilhafter Quellspektren direkt zu messen als auf „Standard-Spektren“ zurückzugreifen.



**Bild 4.2** Beispiele von Quellspektren für „Zugmix“ in 8 m Distanz von Gleismitte.

Aus den Spektren in Bild 4.2 wurde das „Mittelwert-Quellspektrum“ berechnet. Damit das so ermittelte Spektrum mit dem für den 8-m-Punkt ermittelten  $v_{\text{rms}}$ -Wert von 0.075 mm/s kompatibel ist, wurde es zusätzlich mit 1.375 skaliert und in Bild 4.3 dargestellt. Dieses Spektrum könnte als Quellspektrum für Reisezüge mit einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h verwendet werden, wenn keine Messungen vorliegen.



Freq	v-rms	Freq	v-rms
4	0.00084	32	0.03202
5	0.00160	40	0.03607
6.3	0.00178	50	0.03234
8	0.00301	63	0.02386
10	0.00430	80	0.01469
12	0.00738	100	0.00836
16	0.01195	125	0.00486
20	0.01790	160	0.00227
25	0.02699	200	0.00125

Bild 4.3 Quellspektrum beim 8-m-Punkt für Zugmix

### 4.2.2 Frei-Feld-Abminderung

Die Abminderung der Erschütterungen in Funktion der Distanz berechnet sich in VIBRA-2 nach der Formel:

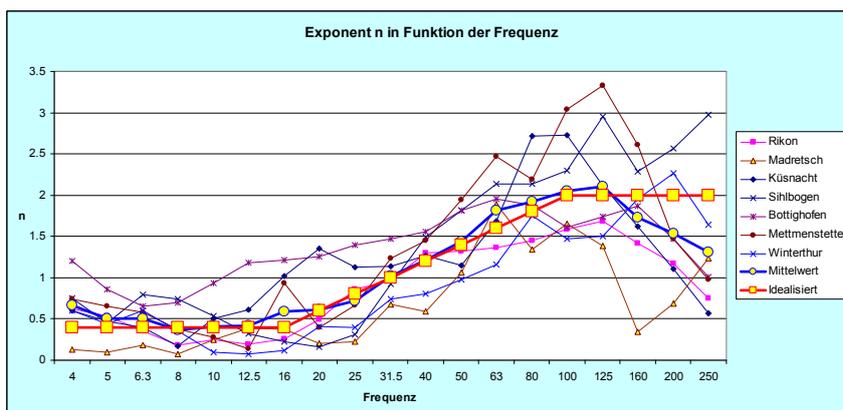
$$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^{n(f)} e^{\left( -\frac{2\pi f D}{v_B} (r-r_0) \right)} \tag{4.1}$$

Wird der Wert für die Materialdämpfung D gleich Null gesetzt, so ergibt sich die einfachere Formel:

$$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^{n(f)} \tag{4.2}$$

mit dem bekannten linearen Abminderungsverhalten in der doppelt-logarithmischen Darstellung.

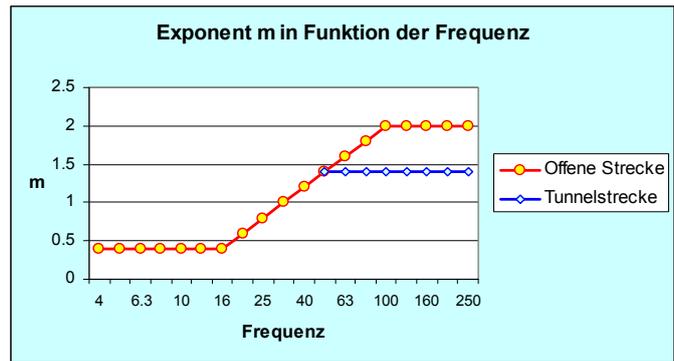
In Bild 4.4 ist das Ergebnis der statistischen Auswertung von 7 Frei-Feld-Messungen zusammengefasst. Der Mittelwert, dargestellt als blaue Linie lässt sich durch die idealisierte rote Linie approximieren.



Freq	n(f)	Freq	n(f)
4	0.4	32	1
5	0.4	40	1.2
6.3	0.4	50	1.4
8	0.4	63	1.6
10	0.4	80	1.8
12	0.4	100	2.0
16	0.4	125	2.0
20	0.6	160	2.0
25	0.8	200	2.0

Bild 4.4a Frequenz-abhängige Exponenten für Frei-Feld-Abminderung bei offener Strecke

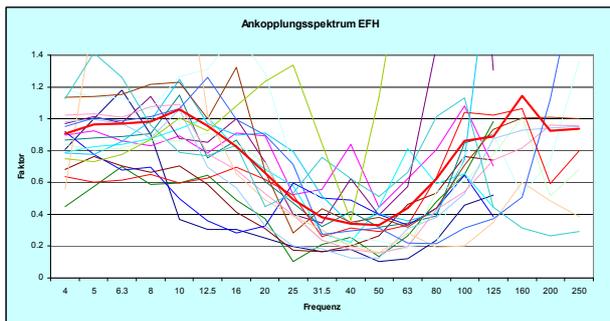
Bei Tunnelstrecken wurde in den tieferen Frequenzen ein ähnliches Verhalten für die Abminderung festgestellt wie bei der offenen Strecke. In den höheren Frequenzen d.h. über 50 Hz, ist die Abminderung allerdings schwächer. Der Exponent  $m$  liegt bei Tunnelstrecken eher im Bereich von 1.4 und nicht wie bei der offenen Strecke im Bereich von 2.



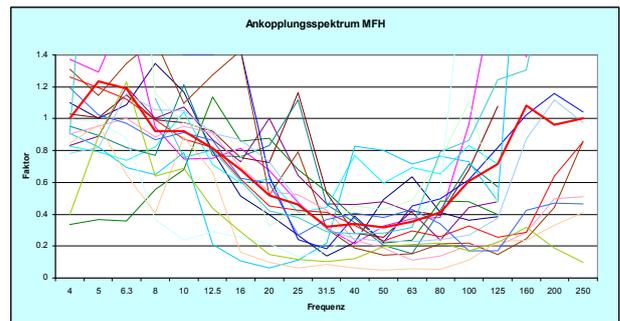
**Bild 4.4b** Frequenz-abhängige Exponenten für Frei-Feld-Abminderung bei Tunnelstrecken

### 4.2.3 Ankopplungs-Transferspektren

Bei der statistischen Auswertung der Ankopplungsspektren wird unterschieden zwischen Einfamilienhäusern (EFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH). In Bild 4.5a und b sind die Ankopplungsspektren für je 30 Gebäude zusammengestellt. Die Streuung unter den einzelnen Messungen ist relativ gross. Die Mittelwerte zeigen jedoch ein einheitliches Bild, mit einer Abschwächung von ca. 60 % im Frequenzbereich zwischen 32 und 60 Hz.

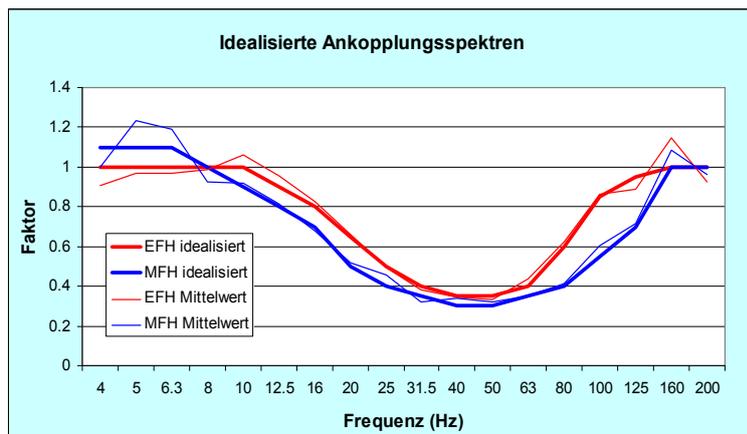


**Bild 4.5a** Ankopplungsspektren für EFH



**Bild 4.5b** Ankopplungsspektren für MFH

Aus den Mittelwertspektren von Bild 4.5a und b wurden die beiden idealisierten Ankopplungsspektren in Bild 4.5c gebildet.

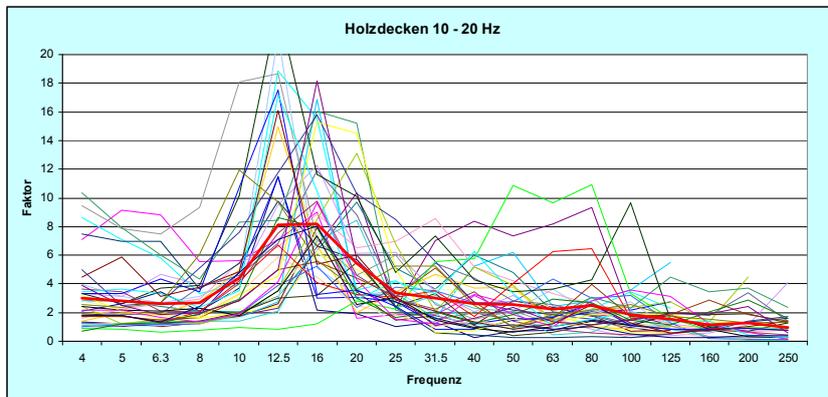


**Bild 4.5c** Idealisierte Ankopplungsspektren

Freq.	EFH	MFH	Freq.	EFH	MFH
4	1.00	1.10	31.5	0.40	0.35
5	1.00	1.10	40	0.35	0.30
6.3	1.00	1.10	50	0.35	0.30
8	1.00	1.00	63	0.40	0.35
10	1.00	0.90	80	0.60	0.40
12.5	0.90	0.80	100	0.85	0.55
16	0.80	0.70	125	0.95	0.70
20	0.65	0.50	160	1.00	1.00
25	0.50	0.40	200	1.00	1.00

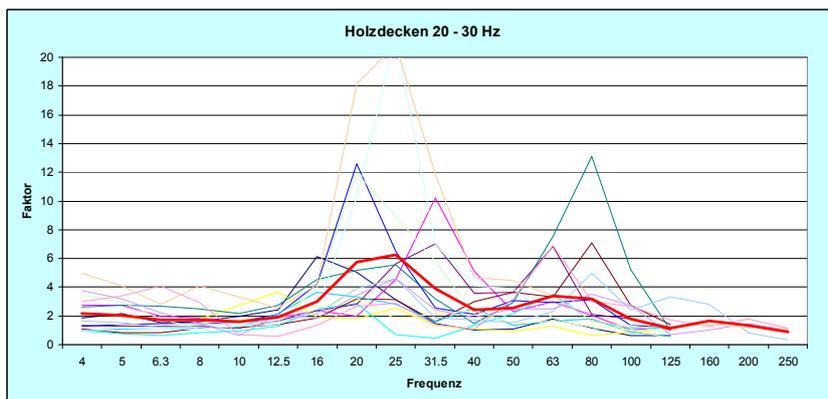
### 4.2.4 Transferspektren für Holzdecken

In den Bildern 4.6a bis c sind die Transferspektren für Holzdecken zusammengestellt. Die meisten Holzdecken haben Eigenfrequenzen zwischen 10 und 20 Hz, weshalb für diese Kategorie am meisten Daten zur Verfügung stehen. Die Streuung ist – wie bereits bei den Ankopplungsfaktoren – relativ gross.



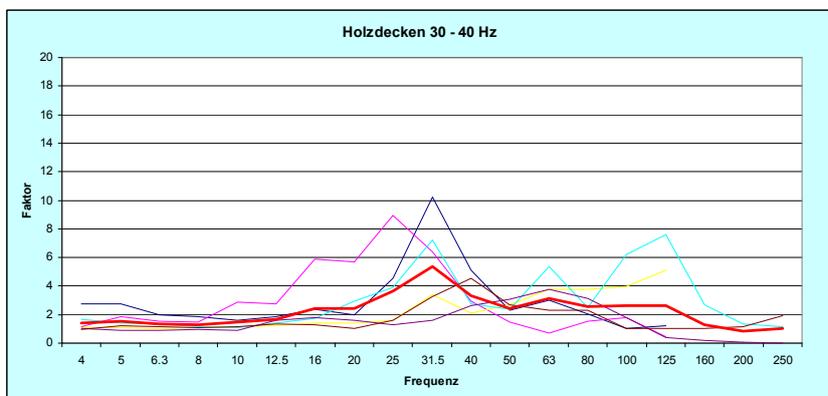
Freq.	Faktor	Freq.	Faktor
4	3.03	40	2.61
5	2.80	50	2.55
6.3	2.62	63	2.26
8	2.66	80	2.49
10	4.39	100	1.87
12.5	8.14	125	1.50
16	8.20	160	1.12
20	5.46	200	1.26
25	3.40	250	0.97
31.5	3.00		

**Bild 4.6a** Transferspektren für 40 Holzdecken mit Eigenfrequenzen von 10 – 20 Hz



Freq.	Faktor	Freq.	Faktor
4	2.15	40	2.46
5	2.04	50	2.54
6.3	1.74	63	3.36
8	1.70	80	3.21
10	1.58	100	1.81
12.5	1.94	125	1.18
16	3.01	160	1.65
20	5.78	200	1.32
25	6.23	250	0.89
31.5	3.87		

**Bild 4.6b** Transferspektren für 15 Holzdecken mit Eigenfrequenzen von 20 – 30 Hz

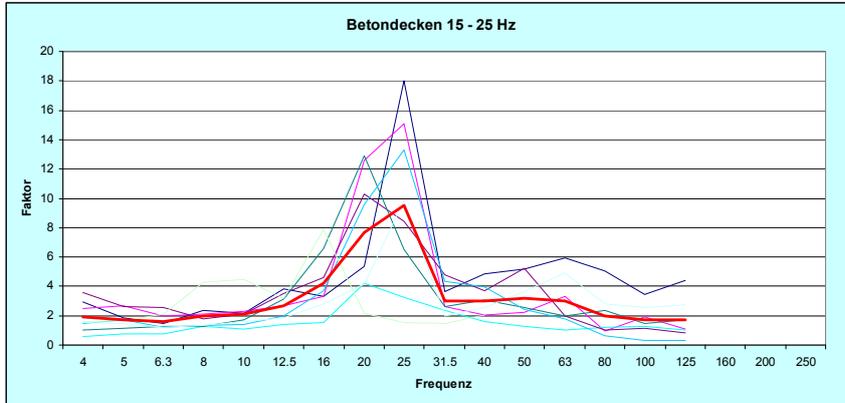


Freq.	Faktor	Freq.	Faktor
4	1.44	40	3.34
5	1.53	50	2.42
6.3	1.32	63	3.16
8	1.26	80	2.55
10	1.46	100	2.63
12.5	1.69	125	2.63
16	2.40	160	1.29
20	2.45	200	0.86
25	3.64	250	1.04
31.5	5.34		

**Bild 4.6c** Transferspektren für 6 Holzdecken mit Eigenfrequenzen von 30 – 40 Hz

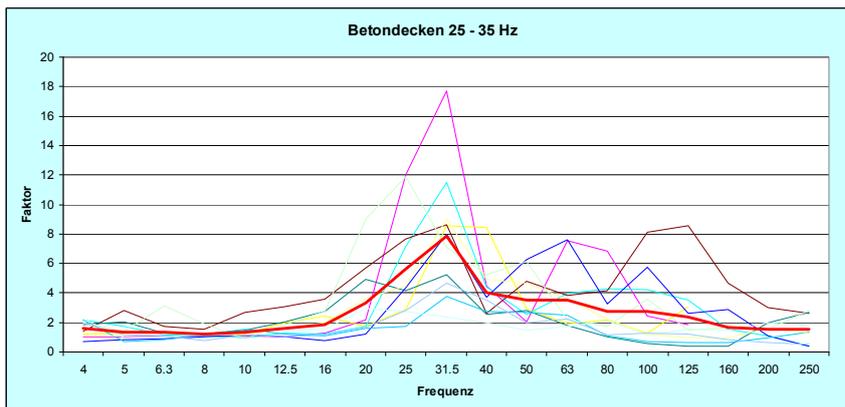
### 4.2.5 Transferspektren für Betondecken

In den Bildern 4.7a bis d sind die Transferspektren für Betondecken zusammengestellt. Die Streuung ist auch hier relativ gross. Typisch für alle Decken ist der Verstärkungsfaktor von ca. 10 im Bereich der Eigenfrequenz.



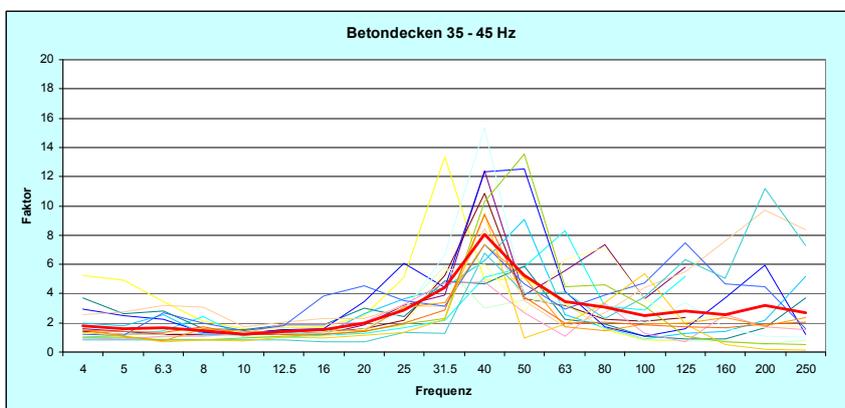
Freq.	Faktor	Freq.	Faktor
4	1.89	40	2.97
5	1.75	50	3.22
6.3	1.58	63	3.00
8	1.97	80	2.01
10	2.11	100	1.73
12.5	2.70	125	1.74
16	4.23	160	
20	7.66	200	
25	9.49	250	
31.5	2.98		

Bild 4.7a Transferspektren für 8 Betondecken mit Eigenfrequenzen von 15 – 25 Hz



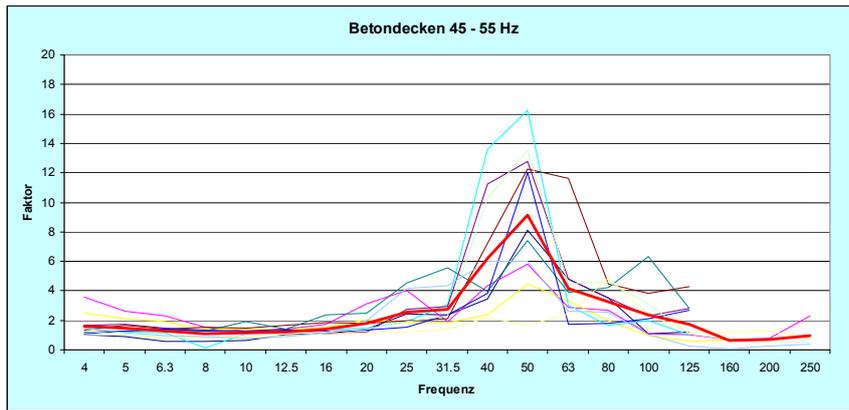
Freq.	Faktor	Freq.	Faktor
4	1.62	40	4.05
5	1.36	50	3.48
6.3	1.34	63	3.54
8	1.23	80	2.73
10	1.33	100	2.75
12.5	1.59	125	2.35
16	1.87	160	1.66
20	3.30	200	1.54
25	5.62	250	1.53
31.5	7.87		

Bild 4.7b Transferspektren für 10 Betondecken mit Eigenfrequenzen von 25 – 35 Hz



Freq.	Faktor	Freq.	Faktor
4	1.79	40	8.05
5	1.61	50	5.23
6.3	1.64	63	3.46
8	1.48	80	3.07
10	1.22	100	2.52
12.5	1.40	125	2.82
16	1.53	160	2.58
20	2.00	200	3.19
25	2.86	250	2.68
31.5	4.42		

Bild 4.7c Transferspektren für 18 Betondecken mit Eigenfrequenzen von 35 – 45 Hz



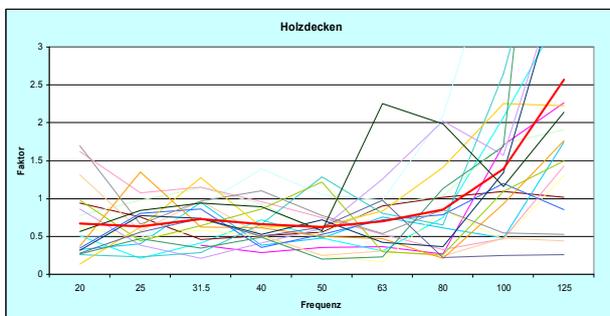
Freq.	Faktor	Freq.	Faktor
4	1.61	40	6.22
5	1.45	50	9.12
6.3	1.28	63	4.14
8	1.06	80	3.26
10	1.17	100	2.37
12.5	1.24	125	1.71
16	1.44	160	0.67
20	1.76	200	0.72
25	2.58	250	0.98
31.5	2.74		

**Bild 4.7d** Transferspektren für 11 Betondecken mit Eigenfrequenzen von 45 – 55 Hz

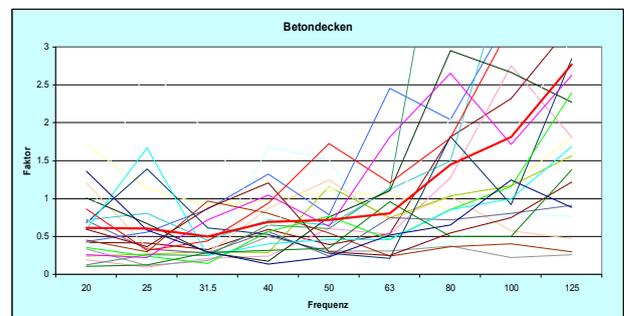
Die Transferspektren für Geschossdecken weisen, wie die Bilder 4.6a bis 4.7d eindrücklich zeigen, eine recht grosse Streuung auf. Sie zeigen aber auch wichtige einheitliche Tendenzen. Im Resonanzbereich ist mit einer Verstärkung von 10 zu rechnen, was einer Dämpfung von 5 % entspricht. Unterhalb der Resonanz liegt die Verstärkung bei 1.5 und oberhalb bei 3. Die höhere Verstärkung oberhalb der Resonanz ist auf das Vorhandensein von höheren Eigenfrequenzen zurückzuführen.

#### 4.2.6 Transferspektren für Körperschall

Bild 4.8a zeigt die gemittelten Transferspektren für Holzdecken und Bild 4.8b diejenigen für Betondecken. Der Unterschied ist – wie man in Bild 4.9 sieht – nicht sehr gross. Oberhalb 100 Hz steigen die Werte und auch die Streuung sehr stark an. Dies ist sicher zum Teil darauf zurückzuführen, dass in diesem Frequenzbereich die gemessenen Amplituden sehr klein sind und die Division von Schalldruck durch Erschütterung keine zuverlässigen Werte mehr ergibt.

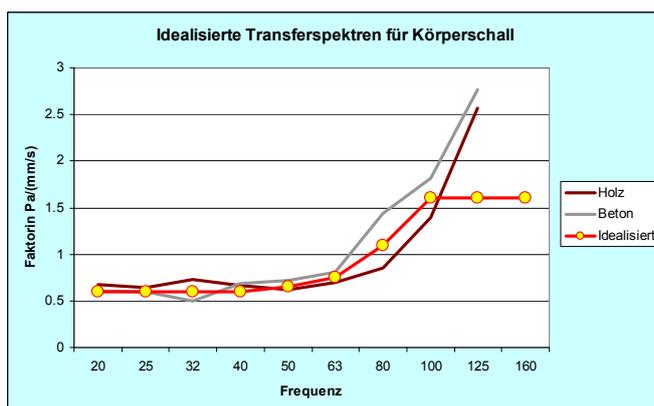


**Bild 4.8a** Transferspektren für 20 Holzdecken



**Bild 4.8b** Transferspektren für 20 Betondecken

Bild 4.9 zeigt das von den Mittelwertspektren für Holz- und Betondecken abgeleitete „Idealisierte Transferspektrum“. Oberhalb 100 Hz sind die Werte nicht mehr gesichert.

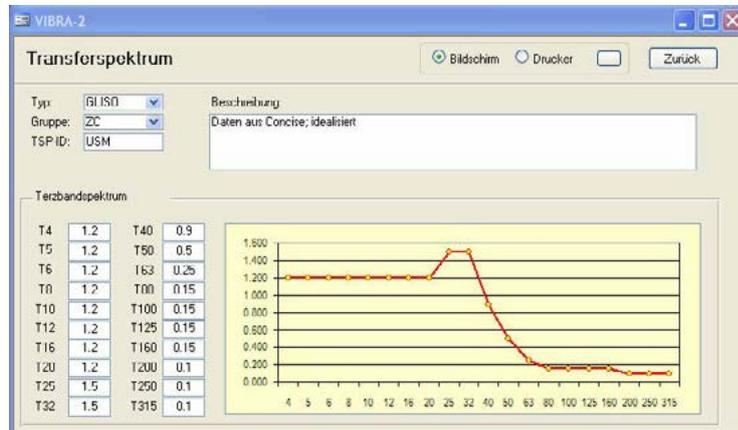


Freq.	Faktor
20	0.6
25	0.6
31.5	0.6
40	0.6
50	0.65
63	0.75
80	1.1
100	1.6
125	1.6

**Bild 4.9** Idealisierte Transferspektren

### 4.2.7 Transferspektren für Gleisolation

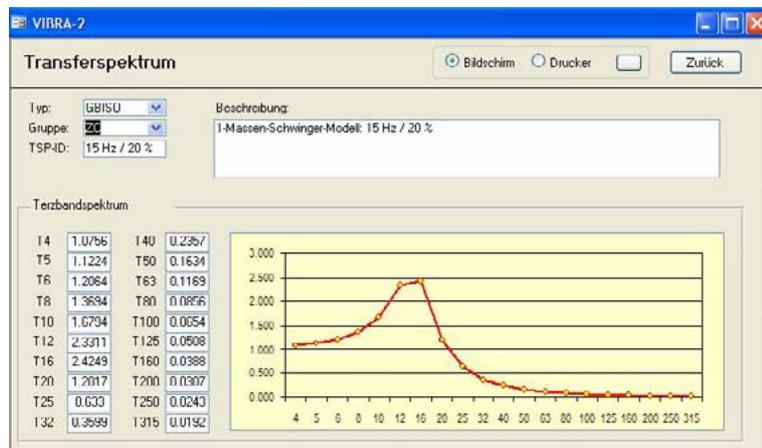
Die Wirkung der Gleisolation wird in der Regel vom Hersteller der Gleisolation in Form eines Einfüge-Dämm-Masses bereitgestellt. Unter Umständen lässt sie sich auch durch Messungen an bereits ausgeführten Projekten ermitteln wie z.B. das Transferspektrum für Unterschottermatten in Bild 4.10 aus dem Tunnel von Concise.



**Bild 4.10** Transferspektrum für Unterschottermatten

### 4.2.8 Transferspektren für Gebäudelagerung

Bei der Berechnung der elastischen Gebäudelagerung wird in der Regel das Modell des Einmassenschwingers verwendet. Dementsprechend wird die Wirkung einer elastischen Lagerung bei gegebener Eigenfrequenz und Dämpfung mit der 1-M-Analogie bestimmt. Bild 4.11 zeigt das Transferspektrum für eine elastische Lagerung bei 15 Hz mit 20 % Dämpfung.



**Bild 4.11** Transferspektrum für elastische Gebäudelagerung

Die Werte des Transferspektrums berechnen sich mit der Gleichung (4.3) für den Transmissionsfaktor beim 1-M-Schwinger:

$$TR \equiv \frac{x'_{\max}}{x_{g0}} = D \sqrt{1 + (2\xi\beta)^2} \quad \text{mit } D \equiv \frac{\rho}{P_0 / K} = \sqrt{\frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (4.3)$$

dabei entspricht  $\xi$  der Dämpfung und  $\beta$  dem Frequenzverhältnis.

### 4.2.9 Transferspektren für Weichen

Über den Einfluss von Weichen existieren relativ wenig Daten und die wenigen existierenden Daten sind erst noch widersprüchlich. Dies hängt damit zusammen, dass es extrem schwierig ist, einen korrekten Vergleich für die Situation mit und ohne Weiche durchzuführen. Bild 4.12 zeigt das Transferspektrum, das aus eine Messung vor und nach dem Einbau einer Weiche gewonnen worden ist.



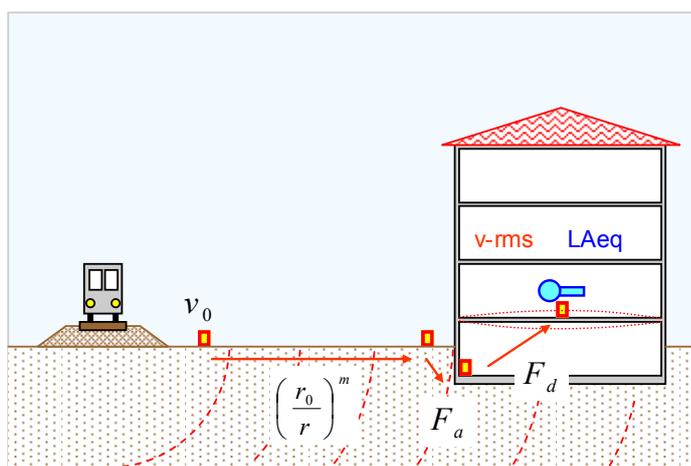
**Bild 4.12** Transferspektrum für den Einfluss einer Weiche

## 5 Das Faktoren-Modell

Beim Faktoren-Modell wird die Erschütterung nur durch einen einzigen Parameter charakterisiert, durch den RMS-Wert des Erschütterungssignals. Durch diese Vereinfachung lässt sich die Erschütterung im Gebäude durch Multiplikation mehrerer Transferfaktoren berechnen. Da das Faktoren-Modell aber auch für die Prognose von Körperschall dienen soll, und weil der Körperschall nicht den gleichen Frequenzbereich abdeckt wie die Erschütterung, kommt man um gewisse „Frequenz-Differenzierungen“ nicht herum. Das hier vorgestellte Faktoren-Modell ist sozusagen ein „Terzspektralen-Modell“ mit nur zwei Terzbändern. Das erste Terzband, das für die Erschütterungen vorgesehen ist, umfasst den gesamten interessierenden Frequenzbereich d.h. 4 bis 250 Hz, während das zweite Terzband nur den Frequenzanteil umfasst, der für den Körperschall relevant ist (32 bis 125 Hz).

### 5.1 Berechnungsablauf

Bild 5.1 veranschaulicht den Rechenablauf beim Faktoren-Modell. Die Erschütterung im Gebäude berechnet sich dabei aufgrund der Erschütterung neben dem Gleis durch Multiplikation mit allen erforderlichen Faktoren. Dazu gehört der Frei-Feld-Abminderungsfaktor mit dem Exponenten  $m$ , der Ankopplungsfaktor  $F_a$  und der Deckenfaktor  $F_d$ . Gesamthaft sind etwa 10 Faktoren zu berücksichtigen, um eine einigermaßen vernünftige Prognose zu erstellen. Diese Abminderungsfaktoren entsprechen den Transferspektren beim Terzspektralen-Modell und werden im Folgenden Transfer-Faktoren genannt.



**ES:** 
$$v = v_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^m F_a \cdot F_d$$
 mit Faktoren für ES

**KS:** 
$$v = v_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^m F_a \cdot F_d$$
  

$$p = v \cdot F_{ks}$$
  

$$L_{Aeq} = 20 \cdot \log\left(\frac{p}{P_{ref}}\right) - A$$
 mit Faktoren für KS

**Bild 5.1** Berechnungsablauf beim Faktoren-Modell

In Gleichung (5.1) ist die in VIBRA-1 verwendete Bestimmungsgleichung für die Erschütterung in Fussbodenmitte wiedergegeben:

$$v_j = v_{0,j} \cdot \left(\frac{G}{G_0}\right)^h \cdot F_t \cdot F_s \cdot F_b \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^m \cdot F_a \cdot F_d \tag{5.1}$$

Sie erlaubt die Berücksichtigung folgender Einflüsse:

- Fahrgeschwindigkeit ( $G$ )
- Trasse-Typ ( $F_t$ )
- Schienenbesonderheit ( $F_s$ )
- Bodeneigenschaften im Gleisbereich ( $F_b$ )
- Freifeldabminderung ( $m$ )
- Ankopplung Boden – Gebäude ( $F_a$ )
- Deckeneigenfrequenz ( $F_d$ )

Für die Berechnung des Körperschalls wird an sich die gleiche Bestimmungsgleichung verwendet wie für die Erschütterung. Da jedoch der Schall unterhalb von 32 Hz praktisch nicht hörbar ist und weil Körperschall über 125 Hz kaum existiert, sind Transferfaktoren einzusetzen, die für den Frequenzbereich von 32 bis 125 Hz Gültigkeit haben. Durch diese Frequenz-Begrenzung ergibt sich der Erschütterungsanteil, der für den Körperschall relevant ist. Mit diesem Erschütterungsanteil ergibt sich - durch Multiplikation mit dem Transferfaktor für Körperschall - der unbewertete Schalldruck und schliesslich mit der Umformung in dB und der A-Bewertung der Körperschall.

## 5.2 Quellparameter und Transferfaktoren

### 5.2.1 Definition der Erschütterungsquelle

Zur Definition der Erschütterungsquelle gehören – wie in Bild 5.2 dargestellt – diverse Parameter zur Beschreibung der Quelle und der Erschütterung. Die zentralen Parameter sind die beiden RMS-Werte für die Erschütterung ( $v_{rms}$ ) und für den Körperschall ( $v_{rms,KS}$ ), deren Herleitung unten näher erläutert werden soll.



Parameter	Erläuterung
Ref.-Distanz.:	Distanz des Sensors vom Gleis
Variationskoeff.:	Streuung der Messdaten
Geschwindigkeit:	Fahrgeschwindigkeit des Zuges
Delta-T:	Vor- und Nachlauf des Signals
$v_{max}$	Peak-Wert
KB:	KB-Wert nach DIN-Norm
K:	K-Wert nach Oe-Norm
$v_{rms}$	RMS-Wert des Signals
$v_{rms,KS}$	RMS-Wert des Signals für KS

**Bild 5.2** Formular zur Erfassung der Erschütterungsquelle im Programm VIBRA-1

Statistische Auswertungen von Messungen bei Reisezügen zeigen, dass die Erschütterungen beim 8-m-Referenzpunkt einen  $v_{RMS}$ -Wert von 0.075 mm/s aufweisen und dass das Terzbandspektrum die in Bild 5.3 dargestellte Form aufweist. Die dominanten Frequenzen liegen somit zwischen 12 und 125 Hz. Für den Körperschall ist der rosa Bereich von 40 bis 125 Hz massgebend. Für die Parameter in VIBRA-1 bedeutet dies, dass für  $v_{RMS,ES}$  der Wert 0.075 mm/s und für  $v_{RMS,KS}$  der Wert 0.060 mm/s einzusetzen sind. In analoger Weise sind alle Transferfaktoren so zu definieren, dass der Faktor für die Erschütterung den gesamten Frequenzbereich umfasst während der Faktor für den Körperschall nur den Frequenzbereich von 40 bis 125 Hz.

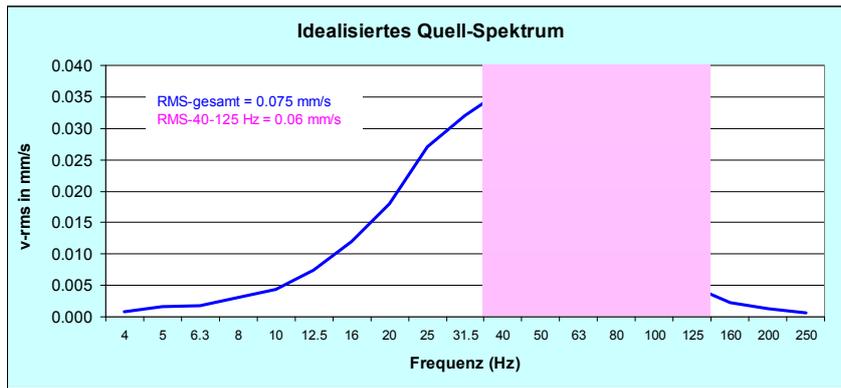


Bild 5.3 Idealisiertes Terzbandspektrum für Reisezüge beim 8-m-Referenzpunkt

### 5.2.2 Frei-Feld-Abminderung

Bild 5.4 zeigt die Frei-Feld-Messwerte von 60 Messreihen mit gesamthaft über 10'000 Zugdurchfahrten. Die Regressionsanalyse ergibt die rote Linie mit der Bezeichnung „Potenziell (Daten 2001 – 2010)“. Der Datensatz „2001 – 2010“ umfasst einen Zugmix (Reisezüge und geringer Anteil Güterzüge) mit Geschwindigkeiten von ca. 90 km/h. Damit ergibt sich für  $v_{rms,8m}$  ein Wert von 0.07 mm/s und für den Abminderungsexponenten  $m$  ein Wert von 0.95.

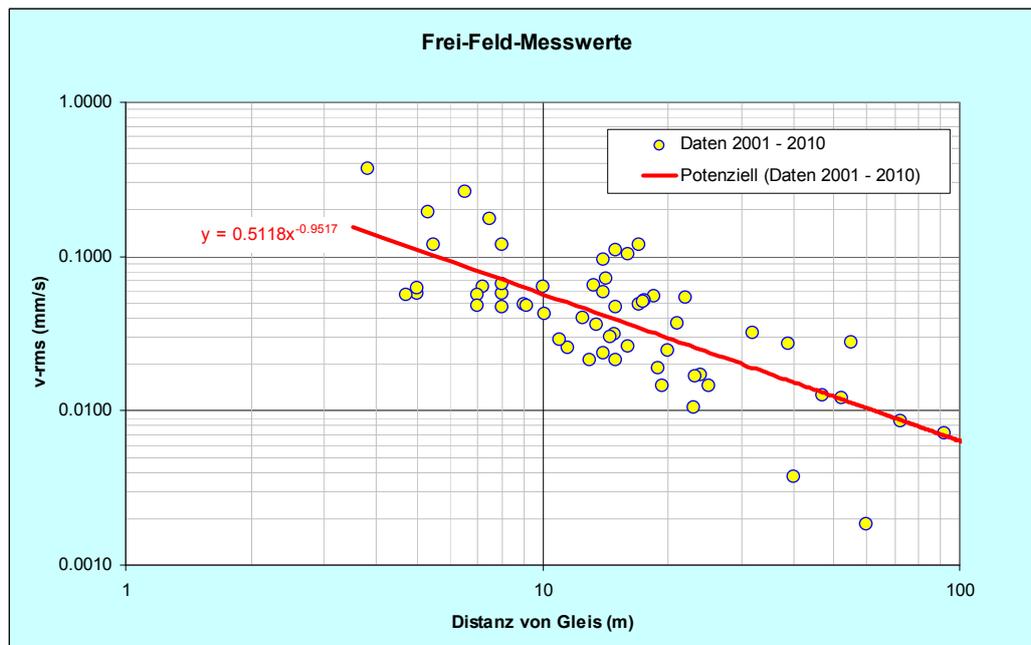
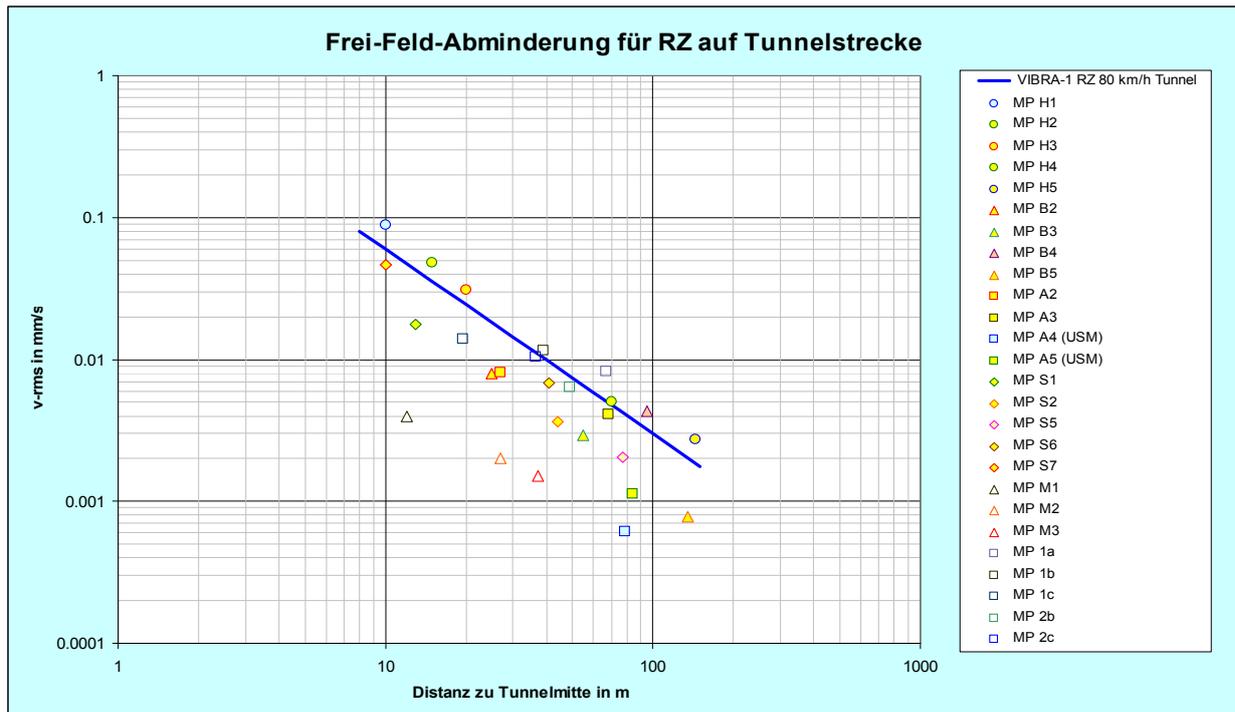


Bild 5.4 Frei-Feld-Abminderung

### 5.2.3 Abminderung bei Tunnelstrecken

Bei Tunnelstrecken wird als Referenzsensor – in Analogie zum Referenzsensor auf offener Strecke – ein Frei-Feld-Sensor über dem Tunnelscheitel mit einer Überdeckung von ca. 20 m gewählt. Bild 5.5 zeigt die Frei-Feld-Messwerte von 5 Tunnels in Funktion der Überdeckung. Als Datengrundlage dienen die Messungen bei den 5 folgenden Tunnels:

- Heitersbergtunnel
- Bözbergtunnel
- Adlerbergtunnel
- Murgentaltunnel
- Tunnel Sierre



**Bild 5.5** Schwinggeschwindigkeit in Funktion der Ueberlagerungshöhe für Reisezüge

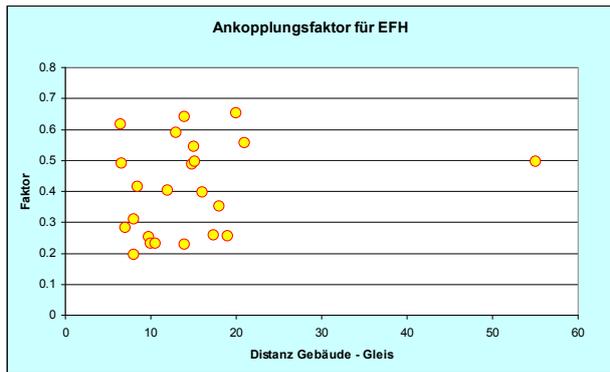
Aus diesen Daten wurde die Abminderungsfunktion  $v = v_0 * (r_0/r)^m$  ermittelt. Die blaue Linie in Bild 5.5 stellt allerdings nicht einen Mittelwert dar, sondern tendiert eher auf die sichere Seite. Der Werte für  $v_0$  (umgerechnet auf 8 m) liegt für Reisezüge mit 80 km/h bei 0.08 mm/s d.h. ähnlich wie bei der offenen Strecke. Der Wert für den Exponent  $m$  liegt bei der Ausbreitung über einem Tunnel bei 1.3. Die Abminderung erfolgt somit bei Tunnelstrecken etwas schneller als bei offenen Strecken.

### 5.2.4 Ankopplungsfaktor

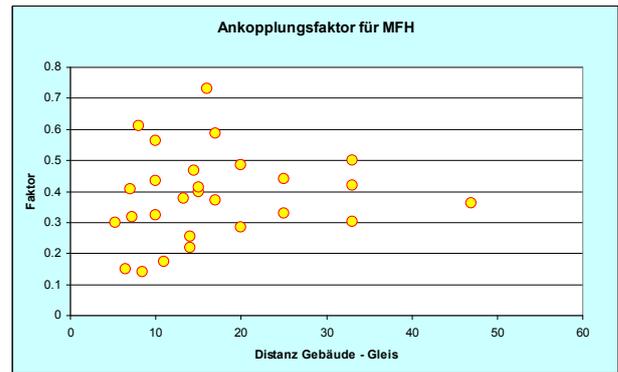
Bei der statistischen Auswertung des Ankopplungsfaktors wird unterschieden zwischen Einfamilienhäusern (EFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) und Industriegebäuden (INDU). Die Ankopplungsfaktoren unterscheiden sich bei diesen drei Kategorien nicht stark und liegen alle bei 0.4. Mit den Diagrammen in Bild 5.5a und b ist die Distanzabhängigkeit der Ankopplungsfaktoren dargestellt. Ein signifikanter Trend lässt sich nicht erkennen.

**Tabelle 5.1** Ankopplungsfaktoren

Gebäude-Typ	Ankopplungsfaktor	COV	Bereich	Anzahl Gebäude
EFH	0.41	0.37	0.20 bis 0.65	23
MFH	0.39	0.37	0.30 bis 0.59	28
INDU	0.42	0.33	0.33 bis 0.57	3



**Bild 5.5a** Ankopplungsfaktoren in Funktion der Gebäudedistanz für EFH



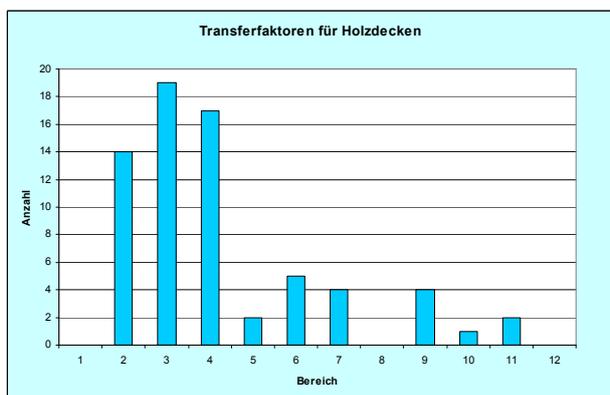
**Bild 5.5b** Ankopplungsfaktoren in Funktion der Gebäudedistanz für MFH

### 5.2.5 Verstärkung durch Geschossdecken

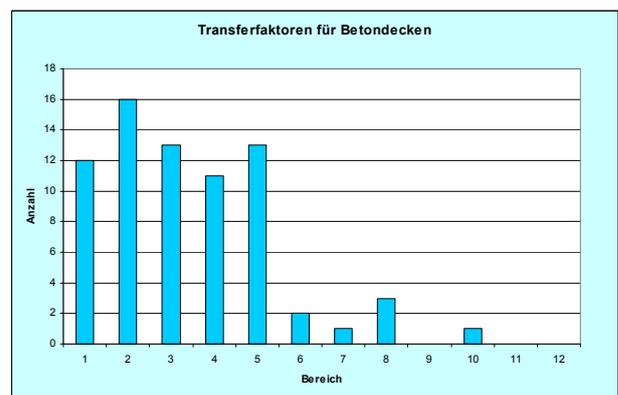
Bei der statistischen Auswertung des Deckenverstärkungsfaktors wird unterschieden zwischen Holzdecken und Betondecken. Für Holzdecken ergibt sich ein Verstärkungsfaktor von 4.23 und für Betondecken ein solcher von 3.43. Der Variationskoeffizient liegt bei beiden Deckentypen zwischen 0.5 und 0.6. Die Häufigkeitsverteilungen in den Bildern 5.6a und b zeigt sich bei den Holzdecken eine Konzentration auf Werte zwischen 2 und 4 und bei den Betondecken zwischen 1 und 5.

**Tabelle 5.2** Verstärkungsfaktoren für Geschossdecken

Decken-Typ	Verstärkungsfaktor	COV	Bereich	Anzahl Gebäude
Holz	4.23	0.54	1.6 bis 11.0	68
Beton	3.43	0.57	1.1 bis 9.6	72



**Bild 5.6a** Verstärkungsfaktor für Holzdecken



**Bild 5.6b** Verstärkungsfaktor für Betondecken

### 5.2.6 Umwandlung von Erschütterung zu Körperschall

Beim Transfer zwischen Erschütterung und Körperschall ist zu beachten, dass die Schwinggeschwindigkeit in physikalischen Einheiten – nämlich in mm/s – angegeben wird, der Schalldruck jedoch im Logarithmus der physikalischen Einheit Pa, d.h. in dBA. Der Transferfaktor ist somit in der Form von:

$$\text{Log}(L_{\text{Aeq}}) = F_{\text{KS}} * v_{\text{rms}} \tag{5.2}$$

anzugeben, wobei  $v_{\text{rms}}$  in mm/s und  $L_{\text{Aeq}}$  in dBA mit  $v_{\text{ref}} = 2 * 10^{-5}$  Pa verwendet werden. In Tabelle 5.3a sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung zusammengestellt. Der Transferfaktor

tor liegt für Holzdecken bei 30 und für Betondecken bei 50. Die Streuung ist sehr gross und weist einen Variationskoeffizienten von 0.74 bzw. 0.97 auf. Viele wichtige Einflussparameter wie die Eigenfrequenz der Decke und die A-Bewertung des Schallpegels werden nicht explizit berücksichtigt.

**Tabelle 5.3a** Transferfaktoren für Körperschall

Decken-Typ	Transferfaktor $F_{KS}$	COV	Bereich	Anzahl Gebäude
Holz	31.5	0.74	8 bis 105	20
Beton	49.6	0.97	10 bis 237	20

Das Problem beim oben definierten Transferfaktor  $F_{KS}$  liegt darin, dass zwei Phänomene kombiniert werden, nämlich die Erzeugung des Schalldrucks durch Erschütterung und die Hörcharakteristik des menschlichen Ohrs mit der A-Bewertung. Ein besserer Ansatz für die Definition des Transferfaktors ergibt sich durch Trennung der beiden Phänomene, d.h. es muss in einem ersten Schritt ein Transferfaktor zwischen der Erschütterung und dem unbewerteten Körperschall gebildet werden. Dabei wird der Frequenzbereich auf den für Körperschall relevanten Bereich von 20 bis 120 Hz begrenzt. Erst in einem zweiten Schritt wird die A-Bewertung zugefügt. Der Transferfaktor ist somit in der Form von

$$p_{rms(20\text{ bis }125\text{ Hz})} = F_{KS} * v_{rms(20\text{ bis }125\text{ Hz})} \tag{5.3}$$

anzugeben, wobei dieser Faktor die Einheiten Pa/(mm/s) hat. Der Transferfaktor ist nun – wie man in Tabelle 5.3b sieht - für beide Deckentypen etwa gleich gross und liegt bei 0.55 Pa/(mm/s). Die Streuung ist mit der Definition von (Gl. 5.3) wesentlich geringer als bei der Definition von (Gl. 5.2).

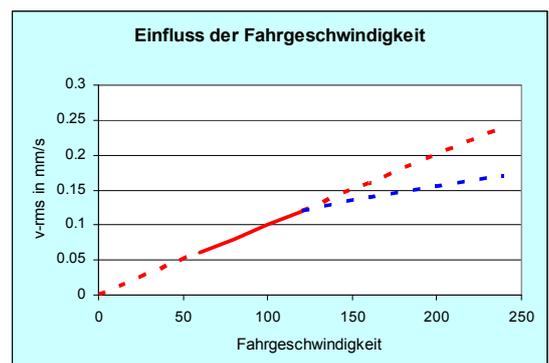
**Tabelle 5.3b** Transferfaktoren für Körperschall

Decken-Typ	Transferfaktor $F_{KS}$	COV	Bereich	Anzahl Gebäude
Holz	0.55	0.35	0.24 bis 0.87	20
Beton	0.56	0.43	0.24 bis 1.22	20

Für die A-Bewertung sind die unterschiedlichen dominanten Frequenzen zu berücksichtigen: Bei Holzdecken dürfte dies das Frequenzband von 50 Hz und für Betondecken das Terzband von 63 Hz sein. Damit ergibt sich für Holzdecken eine A-Bewertung von - 30.2 dB und für Betondecken eine solche von - 26.2 dB.

### 5.2.7 Einfluss der Fahrgeschwindigkeit

Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit wird in (Gl. 5.1) durch den Term  $(G/G_0)^h$  berücksichtigt. Mit  $G$  = Fahrgeschwindigkeit und  $G_0$  = Referenzgeschwindigkeit (i.a. 80 km/h). Der Exponent  $h$  wird zumeist als 1 eingesetzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Erschütterungsstärke linear mit der Geschwindigkeit zunimmt. Dies mag im Bereich zwischen 60 und 120 km/h richtig sein. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten dürfte dieser Ansatz zu hohe Werte liefern. Hier sind noch weitere gezielte Untersuchungen erforderlich.

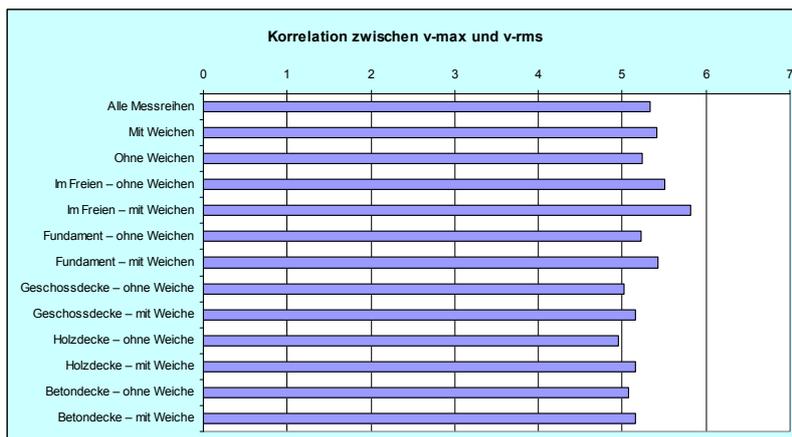


**Bild 5.7** Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Erschütterungsstärke

### 5.3 Korrelation zwischen den charakteristischen Grössen

Die Berechnungen in VIBRA-1 und VIBRA-2 verwenden als Basis-Grösse den RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit über die gesamte Vorbeifahrtdauer. Die übrigen charakteristischen Grössen wie  $v_{max}$  oder  $KB_{FTmax}$  werden am Ende des Berechnungsablaufs durch Multiplikation mit entsprechenden Korrelationsfaktoren bestimmt. Dieses Verfahren setzt implizit voraus, dass die Korrelation zwischen den charakteristischen Grössen konstant ist, d.h. dass die im Frei-Feld ermittelte Korrelation auch im Gebäude gilt. Um dies zu überprüfen wurden die in VIBRA-1 und VIBRA-2 verwendeten Korrelationen für verschiedene Mess-Standorte ermittelt. In Bild 5.8 sind die Ergebnisse für die Korrelation zwischen  $v_{max}$  und  $v_{rms}$  dargestellt. Daraus lässt sich Folgendes entnehmen:

- Der Faktor zwischen  $v_{max}$  und  $v_{rms}$  (auch Crest-Faktor genannt) liegt zwischen 4.9 und 5.8. Der Mittelwert liegt bei 5.3.
- Der tiefste Crest-Faktor ergibt sich erwartungsgemäss für Holzdecken und liegt bei 4.95. Der höchste Crest-Faktor wird im Frei-Feld bei Weichen festgestellt, wo er bei 5.81 liegt.
- Die Variation zwischen den verschiedenen Klassen ist gering, sodass das in VIBRA-1 und VIBRA-2 verwendete Verfahren zulässig ist.



Im Mittel ergeben sich folgende Faktoren für die Korrelationen zwischen den verschiedenen gebräuchlichen charakteristischen Grössen:

Korrelation  $v_{max} - v_{rms}$  : 5.3

Korrelation  $KB_{FT} - v_{rms}$  : 2.2

Korrelation  $v_{rms, 1s} - v_{rms}$  : 1.6

**Bild 5.8** Korrelation zwischen  $v_{max}$  und  $v_{rms}$  für verschiedene Messpunkt-Klassen

## 6 Anwendung in der Praxis

### 6.1 Typische Einsatzgebiete

Die hier beschriebenen empirischen Modelle haben - gegenüber den FE- oder BE-Modellen - den wesentlichen Vorteil, dass sie ohne übermässigen Aufwand für Projekte mit einer grossen Anzahl von Gebäuden eingesetzt werden können. Im Folgenden sollen zwei Beispiele vorgestellt werden. Beim ersten handelt es sich um den neuen Tunnel in Sierre, bei dem ca. 100 Gebäude betroffen sind und beim zweiten um eine neue Untergrundbahn in Südkorea mit ca. 3000 Gebäuden im Einflussbereich.

### 6.1.1 Der neuer Eisenbahntunnel von Sierre

Ein neuer Tunnel in Sierre wird den bestehenden über 100-jährigen Tunnel ersetzen. Mit der neuen Linienführung werden die meisten Gebäude entlastet, doch wird es im Bereich des Ostportals – wie man in Bild 6.1 erkennen kann – wegen der Verschiebung der Trasse für einige Gebäude eine Erhöhung der Immissionen geben.



**Bild 6.1** Neuer Tunnel von Sierre: Rot = neue Linienführung

Um die zukünftigen Immissionen abzuschätzen und erforderlichenfalls Massnahmen zur Reduktion der Immissionen einplanen zu können, wurde eine Studie in Auftrag gegeben. In einer ersten Phase wurde für alle Gebäude im 50-m-Korridor eine Prognose mit VIBRA-1, d.h. mit dem Faktoren-Modell durchgeführt. Damit konnte man erkennen, bei welchen Gebäuden zu hohe Immissionen zu erwarten sind. Bei diesen Gebäuden wurde – in einer zweiten Phase – Erschütterungs- und Körperschallmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen ergaben einerseits die Grundlage für die Definition eines zuverlässigen Quellspektrums und andererseits die Immissionswerte in den kritischen Gebäuden für den jetzigen Zustand. In einer dritten Phase wurde schliesslich eine Prognoserechnung mit VIBRA-2, d.h. mit dem Terzspektren-Modell, für den zukünftigen Zustand durchgeführt, aufgrund derer die Gebäude mit (wahrscheinlichen) Grenzwertüberschreitungen erkannt werden konnten. Mit dem gleichen Modell konnte auch die Wirkung der gewählten Massnahmen berechnet werden.

### 6.1.2 Metro Line 2 Incheon / Süd-Korea

Incheon, die Nachbarstadt von Seoul, plant eine zweite Untergrundbahn mit einer gesamten Länge von 30 km. Da ein grosser Teil dieser neuen Linie unter dicht besiedeltem Stadtgebiet verläuft, stellt sich natürlich die Frage, ob eine elastische Lagerung der Gleise erforderlich ist oder ob darauf verzichtet werden kann.



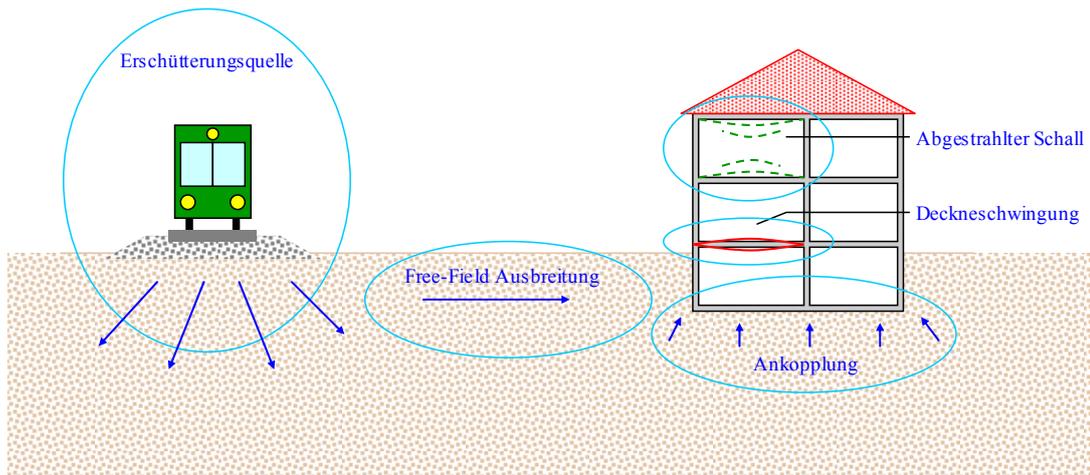
**Bild 6.2** Neue Metro Line in Incheon (Südkorea)

Bei einer Gesamtzahl von ca. 3000 betroffenen Gebäuden ist eine effiziente und systematische Erfassung der relevanten Daten besonders wichtig. Die Strecke wurde eingeteilt in Abschnitte mit gleich bleibender Charakteristik, wobei – wie in Bild 6.2 für den Abschnitt 30 dargestellt – die Parameter *Zonierung* (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Bürogebäude, Industrie), *Streckentyp* (Tunnel, Viadukt), *Tunnelüberdeckung* (4 – 8 m, 8 – 12 m, 12 – 16 m usf.), *Untergrundtyp* (Lockergestein, Fels) und *Gleisbesonderheit* (normale Strecke, Weichen) verwendet wurden.

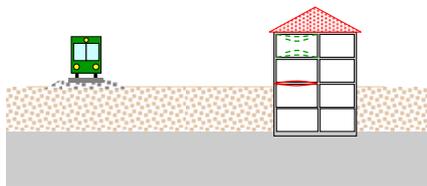
Mit diesen Kriterien wurden die 30 km in 150 Abschnitte eingeteilt und für jeden Abschnitt wurde ein repräsentatives Gebäude ausgewählt. Zusätzlich wurden alle empfindlichen Gebäude im 50-m-Korridor, d.h. die Spitäler, die Konzertsäle, die Radiostudios und die Industrieanlagen mit Präzisionsfertigung erfasst. Für diese ca. 180 Gebäude wurde eine VIBRA-1-Analyse durchgeführt. Anschliessend wurden Erschütterungsmessungen an der bestehenden U-Bahn-Strecke durchgeführt, um für verschiedene Überlagerungshöhen und für die verschiedenen Bodentypen ein adäquates Quellspektrum zu gewinnen. Diese Quellspektren wurden dann in einer VIBRA-2-Analyse eingesetzt um eine verbesserte Prognose für diese 180 Gebäude zu erstellen.

## 6.2 Sonderfälle

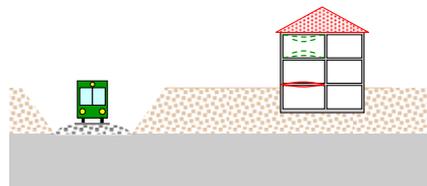
Der weitaus grösste Teil der Messungen werden für die klassische Situation, wie sie in Figur 6.3a abgebildet ist, vorgenommen. Dementsprechend ist auch die Datengrundlage für die Prognose bei klassischen Situationen recht gut. Für Sonderfälle fehlt es jedoch häufig an Messerfahrung. Die Prognose für solche Fälle ist schwierig und zumeist mit grosser Unsicherheit behaftet. Ein gewisser Trost mag sein, dass bei Sonderfällen die Erschütterungsimmissionen meistens geringer sind als beim klassischen Fall. In den folgenden Abschnitten wollen wir uns zwei Sonderfälle näher ansehen.



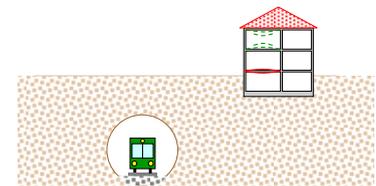
**Bild 6.3a** Klassische Situation: Eisenbahn auf gleichem Niveau wie Gebäude



**Bild 6.3b** Gebäude auf Fels



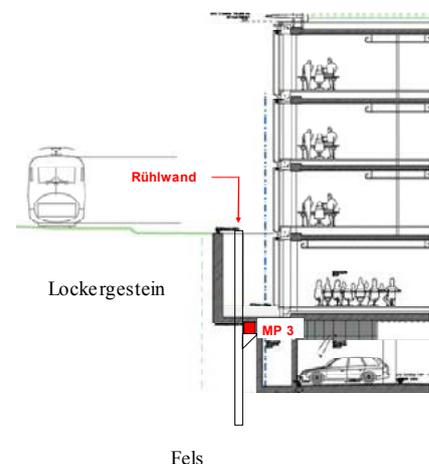
**Bild 6.3c** Eisenbahn auf Fels



**Bild 6.3d** Eisenbahn in Tunnel

### 6.2.1 Sonderfall „Gebäude auf Fels“

Neben den Gleisen der Strecke Zürich – Rapperswil in Männedorf entsteht das neue Bürogebäude von Swarovsky. Free-Field-Messungen zeigen, dass sich die Erschütterungen an der Oberfläche im normalen Rahmen bewegen und eine Erschütterungsisolation erforderlich wäre. In der Baugrube selbst treten jedoch nur minimale Erschütterungen auf (siehe Bild 6.5a: Messpunkt MP 1b). Eine Überprüfung der geologischen Verhältnisse bestätigte, dass eine Situation wie in Bild 6.3b vorliegt. Dies konnte auch durch eine zusätzliche Messung im Nachbargebäude verifiziert werden (Bild 6.5b). Dieser Fall zeigt sehr schön, dass bei Sonderfällen eine Prognose mit den klassischen Ausbreitungsparametern zu erheblichen Fehleinschätzungen führen kann. Auf eine elastische Lagerung konnte im vorliegenden Fall verzichtet werden.



**Bild 6.4** Swarovsky-Neubau

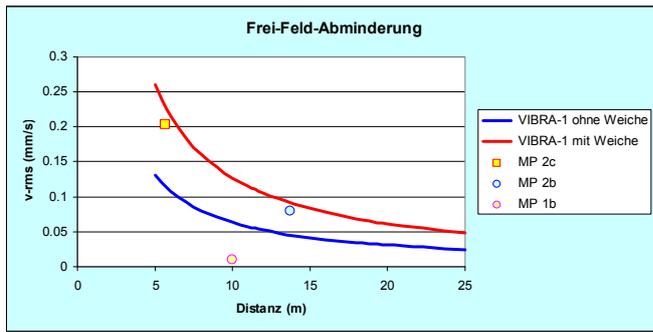


Bild 6.5a Frei-Feld-Messungen

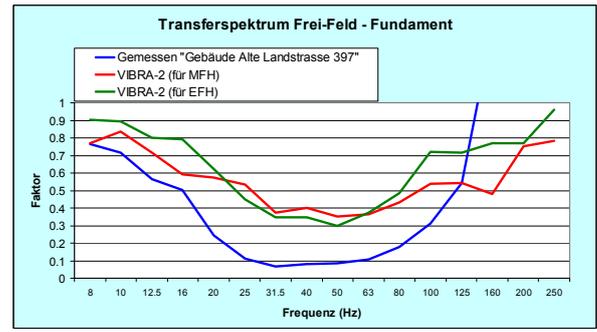


Bild 6.5b Ankopplungsspektrum

### 6.2.2 Horizontalschwingungen

In 99 Prozent aller Fälle sind bei eisenbahn-induzierten Erschütterungen die vertikalen Schwingungen massgebend. Zwar sind im Boden neben dem Gleis oder auf dem Fundament des Gebäudes die horizontalen Komponenten durchaus in der gleichen Grössenordnung wie die vertikale. Doch mit der Verstärkung durch die Geschossdecken werden die Vertikalschwingungen um einen Faktor 3 bis 5 verstärkt, sodass letztlich nur die Vertikalschwingung von Bedeutung ist. Dazu kommt, dass der Mensch auf Vertikalschwingungen empfindlicher reagiert als auf Horizontalschwingungen.

Mehrgeschossige Gebäude in weichen Böden können bei speziellen Bodenverhältnissen unerwartet hohe Horizontalschwingungen aufweisen. Das Beispiel in Bild 6.6a ist ein 6-geschossiges MFH in einer Distanz von 150 m vom Bahngleis. Der Baugrund besteht aus einer Wechsellagerung von Seeablagerungen und weichem Molasseschotter. Als sich nach Bezug der obersten Wohnung erste Beschwerden ergaben wurden Schwingungsmessungen im Gebäude und im Frei-Feld durchgeführt (Bild 6.6b).



Bild 6.6a MFH in ehemaligem Verlandungsgebiet

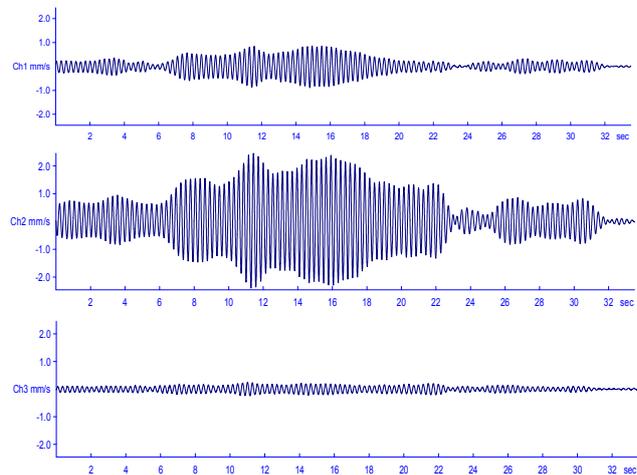
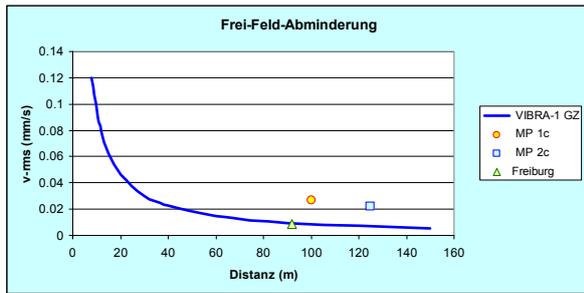
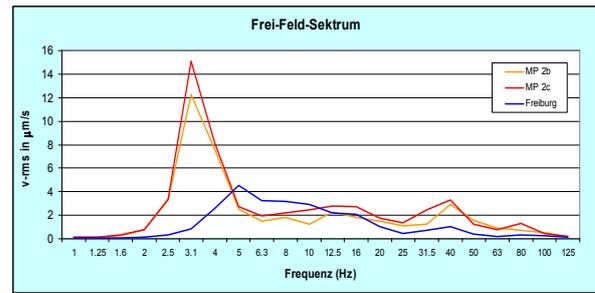


Bild 6.6b Schwingungen im Gebäude bei der Durchfahrt von Güterzügen. Von oben nach unten: hor-x, hor-y, vert.

Bei der Durchfahrt von Güterzügen wurden maximale Horizontalschwingungen von 2 mm/s gemessen. Die Messungen im Frei-Feld (Bild 6.7) zeigen, dass die Schwingungen wesentlich stärker sind als bei normalen Lockergesteinsböden (Beispiel Freiburg) und auch der Spektralgehalt weist eine untypische Spitze bei 3 bis 4 Hz auf (siehe Bild 6.8). Zum Vergleich sind in den Bildern 6.7 und 6.8  $v_{rms}$  und das Spektrum „Freiburg“ aus einer Messung in einem Kies-Sand-Boden dargestellt. Der Grund für die unerwartet hohe Horizontalschwingung ist das Zusammenfallen der Kipp-Eigenfrequenz des auf weichem Boden stehenden Gebäudes mit der horizontalen Anregungsfrequenz im Boden. Es ergibt sich ein Resonanzphänomen mit entsprechend hohen Schwingungsamplituden.



**Bild 6.7** Frei-Feld-Messungen in ehemaligem Verlandungsgebiet



**Bild 6.8** Frei-Feld-Spektren in ehemaligem Verlandungsgebiet.

## 7 Zuverlässigkeit von Prognoserechnungen

Wir haben gesehen, dass – mit dem Faktorenmodell - die Erschütterung in einem Gebäude im einfachsten Fall in der Form von:

$$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^m F_a \cdot F_e \tag{7.1}$$

berechnet werden kann. Zur Vereinfachung der Schreibweise führen wir folgende Größen ein:

$V = v$  für Schwinggeschwindigkeit im Gebäude (Mitte Fussboden)

$Q = v_0$  für Quell-Parameter (Schwinggeschwindigkeit neben Gleis)

$R = \left( \frac{r_0}{r} \right)^m$  für Abstandsfaktor

$A = F_a$  für Ankopplungsfaktor

$E = F_e$  für Eigenschwingungsfaktor (Deckenschwingung)

Damit lässt sich Gleichung (7.1) wie folgt schreiben:

$$V = Q \cdot R \cdot A \cdot E \tag{7.2}$$

Dabei setzen wir voraus, dass alle vier Variablen (Q, R, A und E) log-normale Wahrscheinlichkeitsverteilung aufweisen. Die Erschütterung im Gebäude ist somit eine einfache Funktion von mehreren Zufallsvariablen. Der Erwartungswert einer solchen Funktion berechnet sich nach:

$$\mu_V = e^{\left( \lambda_V + \frac{1}{2} \sigma_V^2 \right)} \tag{7.3}$$

mit

$$\lambda_V = \lambda_Q + \lambda_R + \lambda_A + \lambda_E \tag{7.4}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_Q^2 + \sigma_R^2 + \sigma_A^2 + \sigma_E^2} \tag{7.5}$$

Für Zufallsvariablen mit log-normaler Verteilung gilt:

$$\lambda_Q = \mu(\ln Q) \tag{7.6}$$

$$\zeta_Q = \sqrt{Var(\ln Q)} \tag{7.7}$$

mit

$$\mu(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{7.8}$$

$$Var(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \tag{7.9}$$

$$\sigma_x = \sqrt{Var(x)} \tag{7.10}$$

$$COV = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \tag{7.11}$$

Mit diesem Exkurs in die Wahrscheinlichkeitstheorie lässt sich die Zuverlässigkeit unserer Prognose relativ einfach berechnen. Die Erschütterung im Wohnzimmer soll – wie oben beschrieben – berechnet werden mit der Funktion:

$$V = Q \cdot R \cdot A \cdot E \tag{7.12}$$

In Tabelle 7.1 sind Mittelwerte und Variationskoeffizienten sowie die entsprechenden Grössen für log-normal verteilte Variablen aufgrund der uns zur Verfügung stehenden Messdaten zusammengestellt.

**Tabelle 7.1** Statistische Grössen für die verwendeten Zufallsvariablen

Parameter	Variable	$\mu$	COV	$\lambda$	$\zeta$
Erschütterung 8 m neben Gleis (in mm/s)	Q	0.075	0.25	-2.9	0.246
Abminderungsfaktor für R = 16 m	R	0.5	0.2 *)	-0.69	0.2 *)
Ankopplungsfaktor	A	0.4	0.37	-0.97	0.39
Verstärkungsfaktor der Geschossdecke	E	4.0	0.55	1.32	0.48

\*) Schätzwert

Nach Gl. (7.3) und (7.4) ergibt sich mit den Werten in Tabelle 7.1 für die Erschütterung in Mitte Fussboden ein Erwartungswert von:

$$v_{rms} = 0.05 \text{ mm/s}$$

mit einem Variationskoeffizienten von:

$$COV = 0.7$$

Die Berechnungen in den vorangegangenen Abschnitten, die alle unter der Voraussetzung gemacht wurden, dass keine Messungen vorliegen, sondern nur statistische Auswertungen von Messungen an vergleichbaren Objekten, zeigt, dass der prognostizierte Mittelwert der Erschütte-

rung mit einem Unsicherheitsfaktor von 1.7 behaftet ist. Dies bedeutet, dass wir um die 84-Perzentile zu bestimmen, den Mittelwert mit 1.7 multiplizieren müssen.

Trotz dieses einigermaßen ernüchternden Ergebnisses muss nicht bei jeder Prognose von Erschütterungen bei Eisenbahnlinien mit derart grossen Unsicherheitsfaktoren gerechnet werden. Durch Messung all jener Faktoren, die im Projektierungsstadium bereits gemessen werden können, lässt sich die Unsicherheit erheblich reduzieren.

## 8 Schlusswort

Die Ausführungen in diesem Beitrag sind das „vorläufige“ Ergebnis von mehr als 15 Jahren Messungen bei Eisenbahnlinien. Im Laufe dieser Arbeiten wurden - in enger Zusammenarbeit mit den SBB - die beiden Berechnungsmodelle VIBRA-1 und VIBRA-2 und die Datenbank VIBRA-3 entwickelt. Mit den beiden Modellen lassen sich in systematischer und effizienter Weise die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen für Gebäude in der Nähe von Eisenbahnlinien prognostizieren. Dabei können alle wesentlichen Einflussfaktoren angemessen berücksichtigt werden. Durch die stetige Vergrösserung der Datenbank VIBRA-3 mit neuen Messungen verbessert sich die Datenbasis und damit auch die Prognosesicherheit der Programme VIBRA-1 und VIBRA-2.

Wir müssen uns allerdings stets bewusst sein, dass die Prognose von Eisenbahn-Erschütterungen stets mit erheblicher Unsicherheit behaftet sein wird. Wir werden - wenn keine Messungen vorliegen - immer mit Unsicherheitsfaktoren von ca. 2 für die Erschütterungen und von 6 dB für den Körperschall rechnen müssen. Diese Unsicherheit werden wir auch mit den aufwändigsten Modellen nicht eliminieren können. Der einzige Weg zur Reduktion der Unsicherheit führt über die Messungen. Nur indem wir alle Einflussfaktoren, die bereits in der Projektierungsphase gemessen werden können auch wirklich messen und in die Berechnung einbeziehen, können wir die Unsicherheiten in der Prognose etwas reduzieren.