

# **Zuverlässigkeit von Erschütterungs- und Körperschallprognosen bei Eisenbahnlinien**

---

## **1 Einführung**

Eisenbahn-Neubaustrecken, Umbau von bestehenden Anlagen oder der Bau von neuen Gebäuden in der Nähe von Eisenbahnlinien erfordern die Erstellung von möglichst zuverlässigen Erschütterungsprognosen. Es existieren zahlreiche Methoden für die Berechnung von Erschütterungen und Körperschall in der Nähe von Eisenbahnlinien. Einfache Verfahren berechnen die Immissionen mit Hilfe von empirischen Bestimmungsgleichungen, in denen die Erschütterung im Gebäude als Funktion von einigen wenigen Variablen berechnet wird. Die Koeffizienten der Variablen werden aus der Literatur entnommen oder durch statistische Auswertung von Messungen ermittelt. Bei komplexeren Berechnungsmodellen kann zusätzlich die Frequenzabhängigkeit der Erschütterungsausbreitung berücksichtigt werden. FE-Modelle lassen eine sehr detaillierte Modellierung des Ausbreitungsvorgangs zu.

Bei allen Prognose-Berechnungen stellt sich jedoch immer die Frage: Mit welcher Genauigkeit kann die zu erwartende Erschütterung vorausgesagt werden? Wie hoch ist die Zuverlässigkeit der Prognose und mit welcher Streuung muss gerechnet werden? Im vorliegenden Beitrag soll die Frage der Zuverlässigkeit von Erschütterungs- und Körperschallprognosen bei Eisenbahnlinien mit Hilfe von einfachen Mitteln näher beleuchtet werden. Dabei wird ein empirisches Modell verwendet, in welchem die Erschütterung im Gebäude als Funktion von fünf Variablen berechnet wird. Diese fünf Variablen werden als unabhängige Zufallsvariablen mit logarithmisch-normaler Verteilung betrachtet. Auf diese Weise lässt sich in einfacher Art die Unsicherheit in der einzelnen Einflussfaktoren darstellen und ihr Einfluss auf das Endergebnis berechnen.

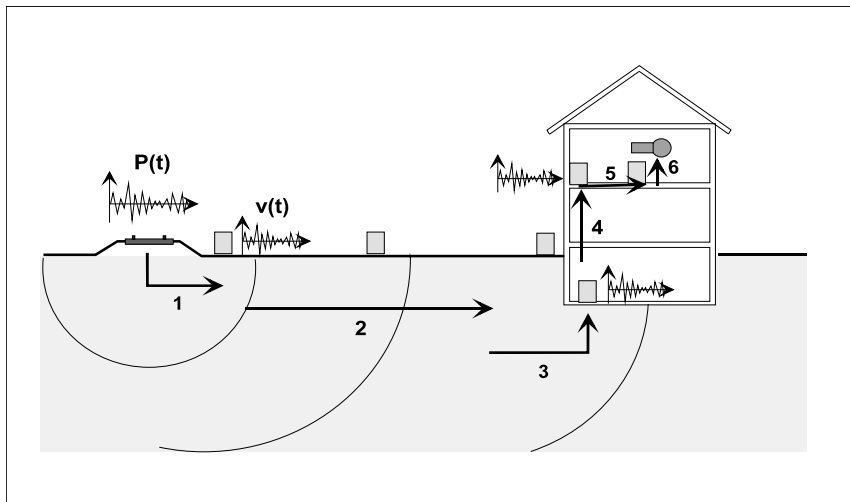
Zur Illustration der Problematik wird anhand von zwei Fällen gezeigt, in welcher Form sich die „Zuverlässigkeitsfrage“ in der Praxis stellt und welche Wege beschritten werden können, um die Unsicherheiten möglichst klein zu halten.

## **2 Das Phänomen Erschütterungsausbreitung und Körperschall**

Die vom Zug verursachten Erschütterungen werden über den Boden auf die Fundamente der umliegenden Gebäude und von hier über die Mauern auf die Wohnräume übertragen. In den Wohnräumen können sich diese Erschütterungen als störende Vibrationen und als Dröhnen (d.h. abgestrahlter Körperschall) manifestieren.

Die Quelle der Erschütterung ist die vom Schienenfahrzeug verursachte zeitvariable Belastung, welche in Bild 2.1 als  $P(t)$  bezeichnet ist. Die Ausbreitung der Erschütterung lässt sich in sechs Abschnitte gliedern:

1. Schiene - Trasse
2. Trasse - Freifeld
3. Freifeld - Fundament
4. Fundament - Aussenmauer
5. Aussenmauer - Geschossdecke
6. Geschossdecke - Körperschall

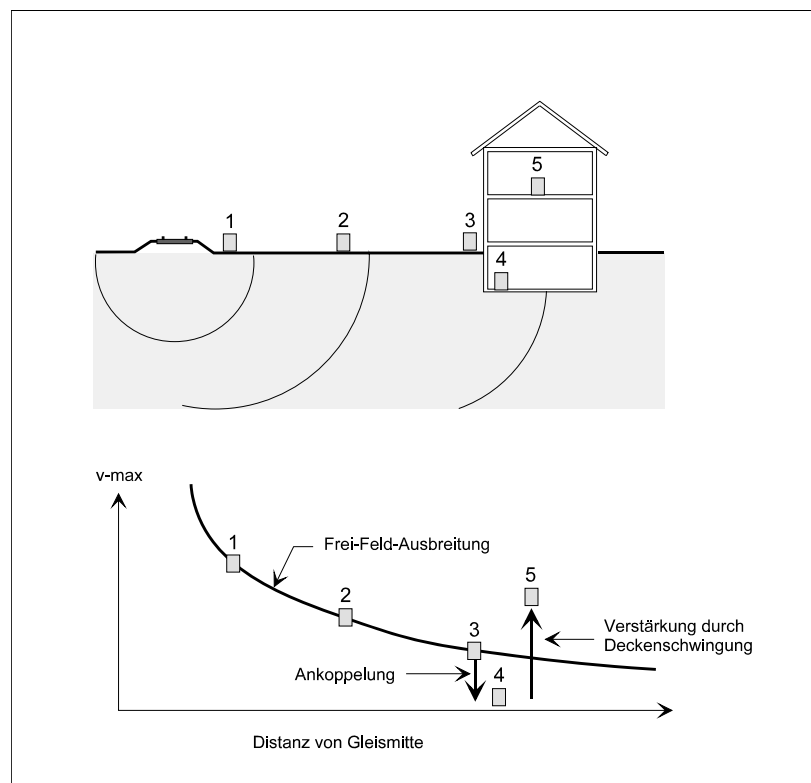


**Bild 2.1** Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr

Die Bereiche 1 bis 5 umfassen die reine Erschütterungsausbreitung, der Bereich 6 die Umwandlung der Gebäude-Erschütterung in sog. Körperschall. Körperschall oder korrekter „sekundärer, abgestrahlter Luftschall“ ist ein Phänomen, dass vor allem in neueren Gebäuden mit relativ steifen Decken und Wänden (i.a. in Betonbauweise) und mit guter Isolation gegen direkten Luftschall zu Problemen führen kann. Körperschall wird in der Regel als tiefes Dröhnen während der Vorbeifahrt eines Zuges wahrgenommen. Wände und Decken wirken wie riesige Lautsprecher und erzeugen durch ihre - oft nicht spürbaren - Vibrationen dieses tiefe Dröhnen.

### 3 Einfaches empirisches Modell

Die vom Zug verursachte Erschütterung wird über den Boden auf das Gebäudefundament und von hier über die Mauern auf die Wohnräume bzw. deren Geschossdecken übertragen. Auf dem Weg vom Gleis zum Gebäudefundament schwächt sich die Erschütterung infolge Ausbreitungs- und Materialdämpfung im Boden ab. Beim Übergang vom Boden auf das Fundament erfährt die Erschütterung eine weitere Reduktion durch den sogenannten Ankopplungseffekt. Die Erschütterung des Gebäudefundamentes erreicht praktisch unverändert die oberen Stockwerke, wird aber durch die Eigenschwingung der Geschossdecken wiederum verstärkt. In Bild 3.1 ist dieses Abminderungsverhalten schematisch dargestellt.



**Bild 3.1** Schematische Darstellung des Abminderungsverhaltens von Erschütterungen

Das in Bild 3.1 gezeigte Abminderungsverhalten kann durch die Gleichung (1) für die Erschütterungsausbreitung wie folgt beschrieben werden:

$$v = v_0 \frac{fg}{fg_0} F_s \left( \frac{r_0}{r} \right)^m F_a \cdot F_e \quad (1)$$

- mit:
- $v$  = Gesuchte Erschütterung in Mitte des Fussbodens
  - $v_0$  = Erschütterung in Referenz-Distanz vom Gleis
  - $fg$  = Mittlere Fahrgeschwindigkeit der Züge
  - $fg_0$  = Referenz-Fahrgeschwindigkeit
  - $F_s$  = Schienenfaktor zur Berücksichtigung von Weichen
  - $r_0$  = Referenzdistanz
  - $r$  = Abstand Gebäudefront – Gleismitte
  - $m$  = Exponent für geom. und Materialdämpfung im Boden
  - $F_a$  = Faktor für Ankopplungsfaktor Gebäude – Baugrund
  - $F_e$  = Faktor für Eigenschwingung der Geschossdecken

Gleichung (1) erlaubt eine einfache Berechnung der Erschütterungsübertragung vom Gleis zum Gebäude. Sie berücksichtigt die wichtigsten Einflussparameter, d.h.:

- Distanz Gleis - Gebäude
- Fahrgeschwindigkeit
- Weiche
- Gebäudetyp
- Deckentyp

Abgestrahlter Körperschall wird - wie oben beschrieben - durch die Vibrationen von Fussboden und Decke und zu einem geringeren Teil auch durch die Vibrationen der Wände verursacht. Der Zusammenhang zwischen Erschütterungsamplitude und abgestrahltem Körperschall in einem Raum ist an sich sehr komplex. Bei der Schallabstrahlung einer ausgedehnten starren Platte im Freien sind die Verhältnisse noch relativ einfach. Der theoretische Zusammenhang zwischen dem abgestrahlten Schall und der Vibration der starren Platte lautet wie folgt:

$$L_p = L_v + 10 \cdot \log \sigma \quad (2)$$

- mit:
- $L_p$  = RMS-Wert des abgestrahlten Schall in dB  
( $p_{\text{ref}} = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa)
  - $L_v$  = RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit der Platte  
( $v_{\text{ref}} = 5 \cdot 10^{-5}$  mm/s)
  - $\sigma$  = Abstrahlungseffizienz

Dies bedeutet, dass - mit den gewählten Referenzwerten - der Schalldruck (in dB) zahlenmässig gleich gross ist wie die Erschütterung zuzüglich eines Terms, der die Abstrahleffizienz der Platte berücksichtigt. Für eine starre Platte im Freien gilt  $\sigma = 1$ , womit der letzte Term in Gleichung (2) zu Null wird. Bei geschlossenen Räumen ist dieser Term wegen der Reflexionen und dem Mitschwingen der Decke und der Wände größer als Null und kann Werte bis zu 20 dB erreichen. Auswertungen verschiedener Messungen und Publikationen zeigen, dass die Abstrahleffizienz zwischen 5 und 15 dB schwankt

Die Berechnung der Körperschallimmission erfolgt somit nach der Formel:

$$Leq = L_v - A + s \quad (3)$$

- mit
- $L_v$  = RMS-Wert von  $v$  während der Zugvorbeifahrt für Frequenzen zwischen 50 und 125 Hz in dB. Der Wert für  $v$  wird nach Gleichung 1 berechnet, allerdings nur mit Berücksichtigung der Frequenzen zwischen 50 und 125 Hz.
  - $A$  = A-Bewertung (= 26 dB für das 63-Hz-Terzband)
  - $s$  = Zuschlag für Übergang von Erschütterung zu Luftschall (Abstrahleffizienz)

## 4 Funktionen von Zufallsvariablen

Wir haben gesehen, dass die Erschütterung im Gebäude in der Form von:

$$v = v_0 \frac{fg}{fg_0} F_s \left( \frac{r_0}{r} \right)^m F_a \cdot F_e \quad (4)$$

geschrieben werden kann. Für die Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen nehmen wir an, dass die Fahrgeschwindigkeit exakt bekannt ist und dass keine Weichen oder Stösse vorliegen. Damit vereinfacht sich Gl. 4 zu:

$$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^m F_a \cdot F_e \quad (5)$$

Des weiteren führen wir – zur Vereinfachung der Schreibweise – 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 (Distanz R)

$A = F_a$  für Ankopplungsfaktor

$E = F_e$  für Eigenschwingungsfaktor (Deckenschwingung)

Damit lässt sich Gleichung (5) wie folgt schreiben:

$$V = Q \cdot R \cdot A \cdot E \quad (6)$$

wobei wir voraussetzen, 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:

$$\mu_V = e^{(\lambda_V + \frac{1}{2}\zeta_V^2)} \quad (7)$$

mit

$$\lambda_V = \lambda_Q + \lambda_R + \lambda_A + \lambda_E \quad (8)$$

$$\zeta_V = \sqrt{\zeta_Q^2 + \zeta_R^2 + \zeta_A^2 + \zeta_E^2} \quad (9)$$

Für Zufallsvariablen mit log-normaler Verteilung gilt:

$$\lambda_Q = \mu(\ln Q) \quad (10)$$

$$\zeta_Q = \sqrt{\text{Var}(\ln Q)} \quad (11)$$

mit:

$$\mu(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

$$\text{Var}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \quad (13)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\text{Var}(x)} \quad (14)$$

$$\text{COV} = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (15)$$

Mit diesem Exkurs in die Wahrscheinlichkeitstheorie lässt sich die Zuverlässigkeit unserer Prognose relativ einfach berechnen.

## 5 Erwartungswert und Streuung

Wir wollen die Erschütterung in einem Einfamilienhaus in 16 m Distanz vom Bahngleis berechnen. Der Zugverkehr entspreche dem durchschnittlichen Zugmix im Vorortsbereich mit mehrheitlich Reisezügen und vereinzelt Güterzügen. In den folgenden Abschnitten werden die statistischen Auswertungen zur Bestimmung der Streuung der einzelnen Faktoren kurz beschrieben.

### 5.1 Erschütterungsquelle

Grundlage bilden 6 Messreihen, bei denen jeweils 100 Zugdurchfahrten gemessen worden sind. Alle 6 Standorte haben ähnliche Verhältnisse bezüglich Trasse, Untergrund und Zugmix. Zwei Arten von Streuungen treten hier auf:

- Die Streuung der Erschütterungsstärke (z.B.  $\text{KB}_{\text{FT}_i}$ -Wert) innerhalb einer Messreihe, bedingt durch unterschiedliches Rollmaterial. Daraus lässt sich Mittelwert und Standardabweichung für einen typischen Zugmix an einem Standort berechnen. Bei den 6 betrachteten Messreihen liegt der Variationskoeffizient für diese Art Streuung zwischen 0.28 und 0.45 mit einem Mittelwert von 0.36.
- Die zweite Art der Streuung ist die Streuung des oben berechneten Mittelwertes innerhalb dieser 6 Messreihen. Er charakterisiert die Unsicherheit, die wir haben bei der Festlegung des Mittelwertes der Erschütterungsquelle. Bei dieser Art Streuung liegt der Variationskoeffizient bei 0.38.

Die relativ grosse Streuung beim Quellparameter ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass der Boden zwischen Trasse und Gebäude nicht immer „freies Feld“ sein muss, sondern auch ein stark verdichteter Strassenkoffer sein kann (Bild 5.1).



**Bild 5.1** Zwei Beispiele von Messobjekten zur Bestimmung der Quellparameter

## 5.2 Abminderungsfunktion

Das Abminderungsverhalten der Erschütterung in Funktion der Distanz vom Gleis wird in unserem Modell beschrieben durch die Funktion:

$$v = v_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^m \quad (16)$$

Für unser Gebäude in einer Distanz von 16 m vom Gleis mit einem Referenzpunkt  $r_0 = 8$  m vereinfacht sich Gl. 16 zu:

$$v = v_0 (0.5)^m \quad (17)$$

Statistische Auswertung von 141 Messungen ergeben für den Exponenten  $m$  einen Mittelwert von 1.08, womit sich Gl. 17 schreiben lässt als:

$$v = v_0 \cdot F_R = v_0 \cdot (0.5)^{1.08} \quad (18)$$

Der Mittelwert von  $F_R$  liegt bei 0.546, der Variationskoeffizient bei 0.48.

## 5.3 Ankopplungsfaktor

Der Ankopplungsfaktor  $F_A$  gibt an, wie stark sich die Erschütterung reduziert beim Übergang von der Frei-Feld-Erschütterung auf das Gebäude. Durch Auswertung von 50 Messungen an Einfamilienhäusern in Betonbauweise wurden folgende Werte ermittelt:

Mittelwert für  $F_A = 0.46$

Variationskoeffizient von  $F_A = 0.45$

## 5.4 Verstärkung durch Geschossdecke

Durch die Eigenschwingung der Geschossdecke wird die Erschütterung wiederum verstärkt. Durch Auswertung von 30 Messungen an Einfamilienhäusern mit Betondecken wurden folgende Werte ermittelt:

Mittelwert für  $F_E = 3.11$

Variationskoeffizient von  $F_E = 0.68$

## 5.5 Umwandlung in Körperschall

Vibrierende Decken und Wände erzeugen sog. Körperschall. In unserem Modell wird der Körperschall berechnet als Funktion von  $v$  in Fussbodenmitte.

$$p = v \cdot F_K \quad (19)$$

In Gl. 19 wird  $p$  und  $v$  als RMS-Wert über die Vorbeifahrtsdauer eines Zuges berechnet, wobei jedoch nur der Frequenzanteil zwischen 50 und 125 Hz berücksichtigt werden darf.  $p$  wird in Pa (Pascal) und  $v$  in mm/s verwendet.

Durch Auswertung von Messungen in 20 Wohnungen wurden folgende Werte ermittelt:

$$\text{Mittelwert für } F_K = 1.25 \quad \text{Variationskoeffizient von } F_K = 0.52$$

## 5.6 Erwartungswert und Streuung in $V$ und $P$

Die Erschütterung und der Körperschall im Wohnzimmer soll – wie oben beschrieben – berechnet werden mit den Funktionen:

$$V = Q \cdot R \cdot A \cdot E \quad (20)$$

$$P = V_{63-100} \cdot K \quad (21)$$

In Tabelle 5.1 sind Mittelwert und Variationskoeffizienten sowie die entsprechenden Grössen für log-normal verteilte Variablen zusammengestellt.

**Tabelle 5.1** Statistische Grössen für die verwendeten Zufallsvariablen

Parameter	Variable	$\mu$	$\sigma$	COV	$\lambda$	$\xi$
Erschütterung 8 m neben Gleis (in KB)	Q	0.324	0.123	0.379	-1.198	0.388
Abminderungsfaktor für $R = 16$ m	R	0.546	0.264	0.483	-0.751	0.590
Ankopplungsfaktor	A	0.462	0.206	0.447	-0.867	0.441
Verstärkungsfaktor der Geschossdecke	E	3.113	2.122	0.682	0.936	0.626
Umwandlung zu Körperschall	K	1.250	0.653	0.522	0.122	0.432

Nach Gl. (7) und (8) ergibt sich mit den Werten in Tabelle 5.1 für die Erschütterung im Wohnzimmer ein Erwartungswert von:

$$V = 0.263 \text{ KB}$$

mit einem Variationskoeffizienten von:

$$\text{COV} = 1.04$$

In analoger Weise ergibt sich für den Körperschall im Wohnzimmer ein Erwartungswert von:

$$P = 0.074 \text{ Pa}$$

mit einem Variationskoeffizienten von:

$$\text{COV} = 1.13$$

Umgerechnet in dBA erhalten wir für den Körperschall:

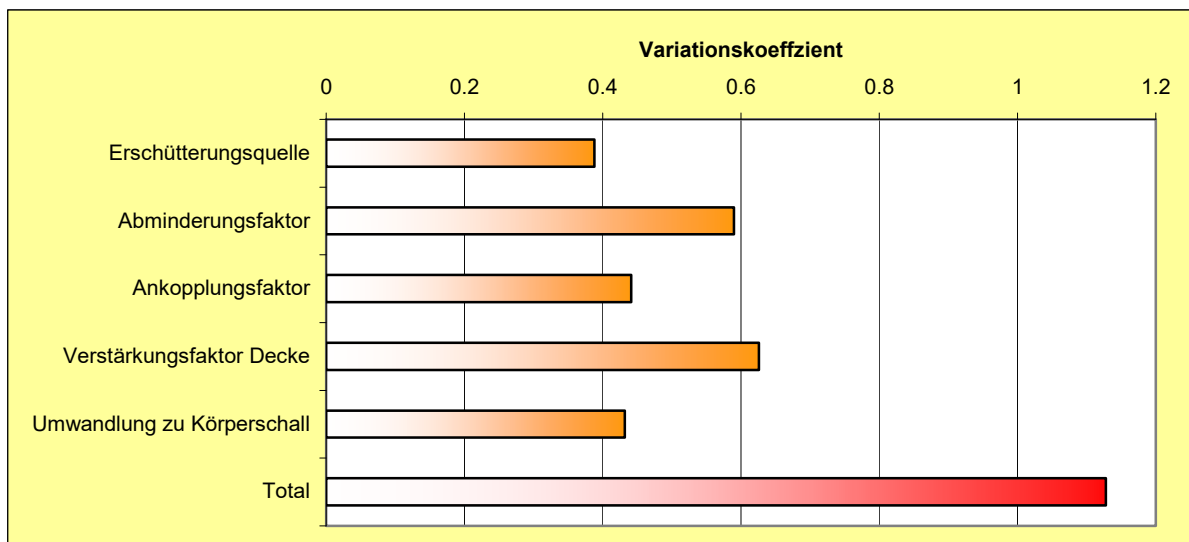
$$L_{eq_{KS}} = 45.4 \text{ dBA} \pm 6.5 \text{ dB}$$

### 5.7 Diskussion der Ergebnisse

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, hat folgendes gezeigt:

- Der prognostizierte Mittelwert der Erschütterung in einem Raum ist mit einem Unsicherheitsfaktor von 2 behaftet. Der Variationskoeffizient beträgt 1.04 und damit ist der Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung etwa doppelt bzw. halb so hoch wie der Mittelwert selbst.
- Der prognostizierte Mittelwert des Körperschalls in einem Raum ist mit einer Unsicherheit von  $\pm 6.5$  dB behaftet. Der Variationskoeffizient beträgt 1.13 und damit ergibt sich durch Umrechnung in dB ein Streubereich für einfache Standardabweichung von  $\pm 6.5$  dB.

In Bild 5.1 sind die Beiträge der einzelnen Einflussfaktoren dargestellt. Man erkennt, dass der Verstärkungsfaktor der Decke und der Abminderungsfaktor für die Ausbreitung im Frei-Feld die grössten Beiträge an die Streuung beisteuert. Aber auch bei den anderen drei Einflussgrössen ist die Streuung nicht wesentlich geringer.



**Bild 5.1** Variationskoeffizienten der einzelnen Einflussfaktoren

Trotz dieses einigermaßen ernüchternden Ergebnisses muss nicht bei jeder Prognose von Erschütterung und Körperschall bei Eisenbahnlinien mit diesen grossen Unsicherheitsfaktoren gerechnet werden. Durch Messung all jener Faktoren, die im Projektierungsstadium bereits gemessen werden können, lässt sich die Unsicherheit erheblich reduzieren. In den folgenden Abschnitten wird anhand von zwei Beispielen gezeigt, wie durch Kombination von Messung und geeignetem Prognoseverfahren relativ zuverlässige Prognosen erstellt werden können.



## 6 Erschütterungsprognose mit VIBRA-2

### 6.1 Fallbeispiel 1: Felsenburg Stäfa

Das ursprüngliche Gebäude „Felsenburg / Stäfa“ war ein altes Gebäude mit einem Kellergeschoss in Bruchsteinmauerwerk und einem Erdgeschoss in Holzbauweise. Es liegt direkt über dem Eisenbahntunnel nördlich des Bahnhof Stäfa an der Eisenbahnstrecke Zürich – Rapperswil. Die Tunnelüberdeckung beträgt ca. 7 m. Beim Umbau wurde das Erdgeschoss und der Dachstock entfernt, auf die Kellermauern wurde eine Betonplatte platziert und darauf ein neues Wohnhaus in Holzbauweise erstellt. Um die Übertragung von Vibrationen aus dem Zugverkehr auf das Wohnhaus zu reduzieren, wurde die Betonplatte elastisch auf den Kellermauern gelagert (siehe Bilder 6.1a bis d)



**Bild 6.1a** Gebäude Felsenburg



**Bild 6.1b** Tunnelportal unmittelbar vor dem Gebäude Felsenburg



**Bild 6.1c** Elastische Lagerung der Aussenmauern mit Sylomer-Streifen



**Bild 6.1d** Elastische Lagerung der Innenmauern mit Sylomer-Streifen

#### 6.1.1 Vergleich der Kennwerte

Vor dem Beginn der Bauarbeiten wurden die Erschütterungen auf dem Fundament des alten Gebäudes gemessen und mittels einer Berechnung mit VIBRA-2 die im neuen Gebäude (mit Erschütterungsisolierung) zu erwartenden Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen berechnet. In Tabelle 6.1 sind diese Werte in der Spalte Prognose I zusammengestellt. Auf dem Fundament wurde ein mittlerer KB-Wert von 0.058 gemessen. Für das Schlafzimmer im EG wurde ein KB-Wert von 0.051 und ein Körperschallwert von 23.1 dBA prognostiziert.

Nach dem Erstellen des Rohbaus konnten die Erschütterungen auf der elastisch gelagerten Betonplatte gemessen werden. Aufgrund der neuen Daten wurde wiederum eine Prognose erstellt (Prognose II). Auf dem Fundament wurde ein mittlerer KB-Wert von 0.061 gemessen.

Im Schlafzimmer im EG wurde ein KB-Wert von 0.031 gemessen und ein Körperschallwert von 27.0 dBA prognostiziert.

Nach dem Bezug des Gebäudes konnten sowohl Erschütterungen als auch Körperschall gemessen werden. Auf dem Fundament wurde ein mittlerer KB-Wert von 0.059 gemessen. Im Schlafzimmer im EG wurde ein KB-Wert von 0.067 und ein Körperschallwert von 31.1 dBA gemessen.

**Tabelle 6.1** Prognostizierte und gemessenen Werte

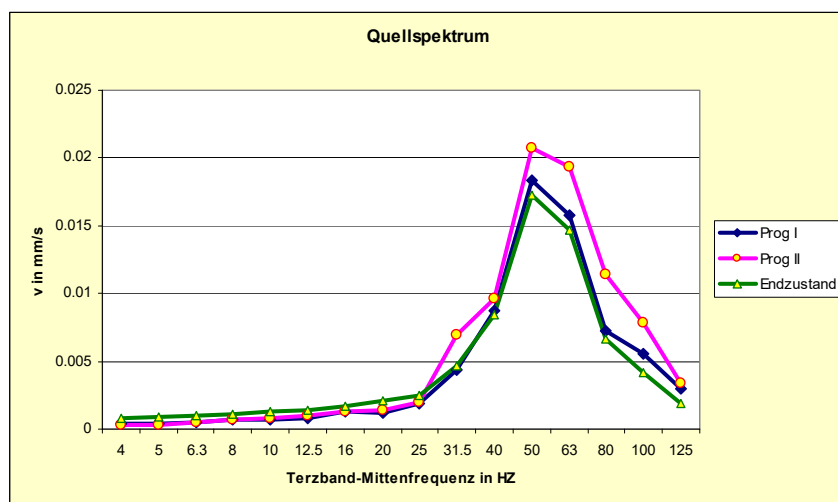
	Prognose I	Prognose II	Endzustand
Frei-Feld	Nicht gemessen	0.077	0.098
Fundament	0.058	0.061	0.059
Schlafzimmer - ES	0.051	0.031	0.067
Schlafzimmer - KS	23.1 dBA	27.0 dBA	31.1 dBA

Der Vergleich der Werte in Tabelle 6.1 zeigt folgendes:

- Die Anregung (d.h. die Erschütterung auf dem Fundament) hat sich praktisch nicht verändert.
- Die Erschütterungen im Schlafzimmer sind 30 % höher als die Prognose
- Der Körperschall im Schlafzimmer ist 8 dB höher als die Prognose

### 6.1.2 Vergleich der Spektren

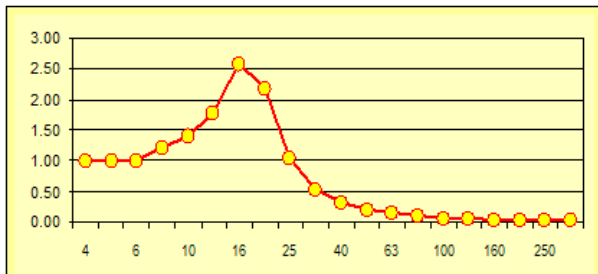
Die Erschütterung des Gebäudefundamentes stellt - in der vorliegenden Betrachtung – das Quellspektrum dar. Bild 6.2 zeigt die (auf Messung beruhenden) Quellspektren. Die Linie „Prog I“ basiert auf der Messung im alten Gebäude, die Linie „Prog II“ basiert auf der Messung im Rohbau und die Linie „Endzustand“ auf den Messungen nach dem Bezug des Hauses. Die Anregung hat sich, wie man aus Bild 6.2 entnehmen kann, nicht wesentlich verändert. Die Hauptfrequenzen liegen zwischen 40 und 80 Hz.



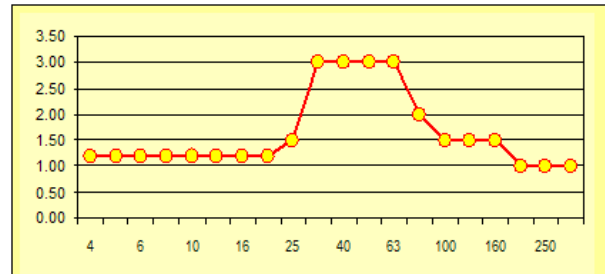
**Bild 6.2** Quellspektren

Das Transferspektrum Fundament – Betondecke setzt sich zusammen aus der Wirkung der Isolation und der Wirkung der Betondecke. Für die Prognose wurde für die Wirkung der Isolation ein Ein-Massen-Schwinger mit 18 Hz und 10 % Dämpfung zugrunde gelegt. Das zugehörige Transferspektrum ist in Bild 6.3a wiedergegeben.

Das Transferspektrum für die Betondecke allein wurde durch statistische Auswertung einer grossen Anzahl von Messungen an Betondecken mit Eigenfrequenzen zwischen 30 und 50 Hz ermittelt (siehe Bild 6.3b).

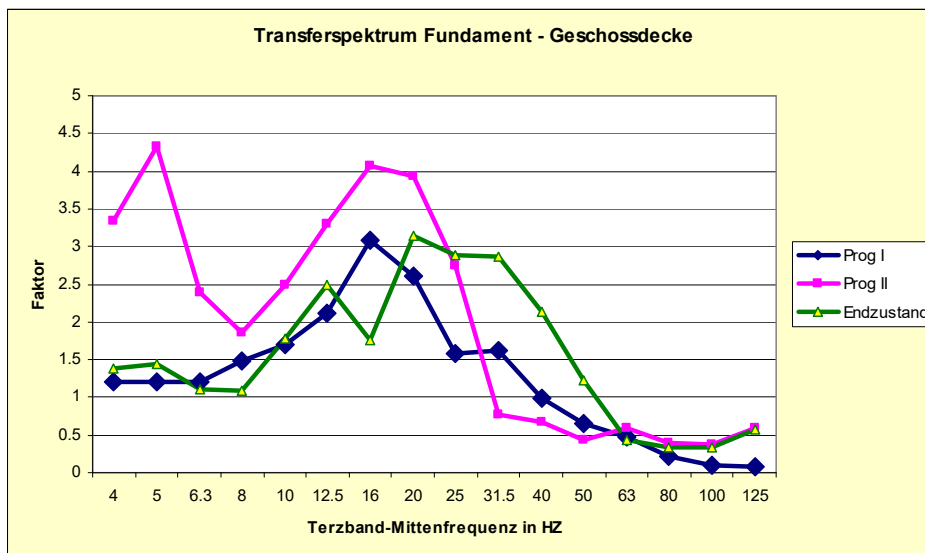


**Bild 6.3a** Transferspektrum für Isolation



**Bild 6.3b** Transferspektrum für Betondecke

Durch Multiplikation der beiden Spektren (Bild 6.3a und 6.3b) ergibt sich das in der Prognose I verwendete Transferspektrum (siehe Bild 6.4 Linie Prog I). Die Linie „Prog II“ basiert auf der Messung im Rohbau und die Linie „Endzustand“ auf den Messungen nach dem Bezug des Hauses. Der Vergleich der Linie „Endzustand“ mit der Linie „Prog I“ in Bild 6.4 zeigt, dass die Annahmen für die Prognose (d.h. Bild 6.3a und 6.3b) nicht schlecht sind. Die Hauptfrequenzen sind allerdings etwas zu tief. Offensichtlich war die Annahme einer Grundfrequenz von 18 Hz für das elastisch gelagerte Gebäude etwas zu optimistisch. Effektiv lag die Eigenfrequenz bei 20 Hz.



**Bild 6.4** Transferspektrum Fundament - Betondecke

Bild 6.5 zeigt den Vergleich zwischen dem in der Prognose angenommenen Transferspektrum und dem gemessenen Transferspektrum. Die Übereinstimmung ist recht gut.

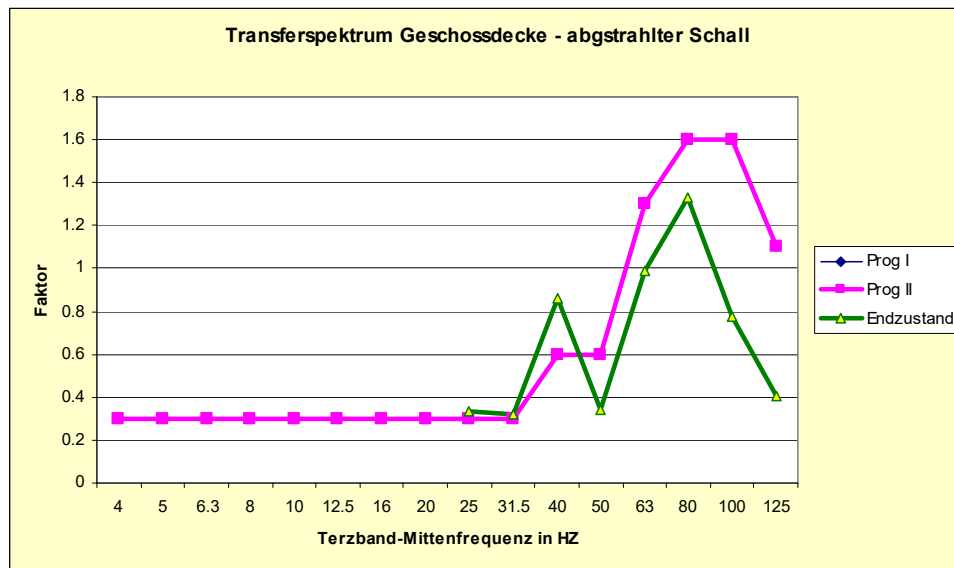


Bild 6.5 Transferspektren Betondecke – Körperschall

### 6.1.3 Beurteilung

Die durchgeführten Messungen und Auswertungen führen zu folgenden Ergebnissen:

- Der Mittelwert der Erschütterungen liegt bei  $KB = 0.067$  mit einer Standardabweichung von  $0.020$ . Solche Erschütterungen sind sehr tief. 90 % der Zugdurchfahrten liegen unterhalb der Wahrnehmungsgrenze.
- Die gemessenen Erschütterungen liegen 30 % höher als die in der Prognose berechneten Werte. Eine Abweichung von 30 % ist in Anbetracht der grossen Unsicherheiten bei den Berechnungsgrundlagen als relativ gut zu bezeichnen.
- Der abgestrahlte sekundäre Schall (sog. Körperschall) liegt für eine einzelne Zugdurchfahrt im Mittel bei 31 dBA. Dieser Wert ist ebenfalls relativ tief. Tags werden Werte unter 30 dBA, nachts Werte unter 27 dBA kaum mehr wahrgenommen.
- Die gemessenen Körperschallwerte liegen 8 dB höher als die in der Prognose berechneten Werte. Diese Abweichung ist relativ gross.

Zwei Gründe dürften für die Abweichung beim Körperschall verantwortlich sein: Ein Grund dürfte im gegen den Keller offenen Treppenhaus zu suchen sein. Da der Keller gegen Erschütterungen nicht isoliert ist, entsteht im Keller recht starker Körperschall, der durch das offene Treppenhaus ins EG dringen kann. Der zweite Grund dürfte in der Annahme einer Grundfrequenz für das elastisch gelagerte Gebäude von 18 Hz statt 20 Hz liegen.

Gesamthaft gesehen sind die erstellten Prognosen und die gewählten Massnahmen als 100-prozentiger Erfolg zu werten. Die Erschütterungen sind praktisch nicht spürbar und die Körperschall-Immissionen werden im EG nur ganz schwach und im OG überhaupt nicht wahrgenommen.



## 6.2 Fallbeispiel 2: Überbauung Zentrum Seebach

Die Überbauung „Zentrum Seebach“ grenzt mit einer Seite an das Trasse der Eisenbahnlinie Seebach – Opfikon. Der Abstand des am nächsten beim bestehenden Gleis liegenden Gebäudeteils (Zufahrtsrampe) beträgt 8 m. Für die Reduktion der Immissionen wurde folgende Massnahme gewählt: Trennung der Garagenzufahrt vom übrigen Gebäude, sodass die wirksame Distanz zum Gleis 8 m grösser wird.

Während dem Bau wurde die Ausführung der Trennfugen laufend überwacht. Durch Messungen nach jeder Etappe wurde die Wirksamkeit der Trennfuge jeweils geprüft. Nach der Fertigstellung von 2 Stockwerken des Wohntrakts wurde die Abnahmemessung durchgeführt.



**Bild 6.6a** Gelände vor Baubeginn



**Bild 6.6b** Zufahrtsrampe durch elastische Fuge vom Gebäude getrennt



**Bild 6.6c** Elastische Fuge zwischen Rampe und Gebäude vor dem Betonieren der Rampe



**Bild 6.6d** Elastische Lagerung der Decke über der Zufahrtsrampe vor dem Verlegen der Armierung

### 6.2.1 Vergleich der Kennwerte

Vor Baubeginn wurde eine Prognose über die Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen mit Hilfe des Programms VIBRA-2 durchgeführt. Als Grundlage dienten die Messungen der Zugserschütterungen im freien Feld im Bereich der projektierten Überbauung sowie verschiedene Transferspektren, die durch statistische Auswertung einer grossen Anzahl von Messungen bei anderen Gebäuden gewonnen wurden. Die Ergebnisse dieser Prognose sind in Bild 6.7 zusammengestellt. Nach der Erstellung des Rohbaus wurde eine analoge Berechnung durchgeführt. Diesmal wurde als Grundlage die im 1. OG in Deckenmitte gemessene Erschütterung eingesetzt. Darauf basierend wurden die Körperschall-Immissionen berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Bild 6.8 zusammengestellt.

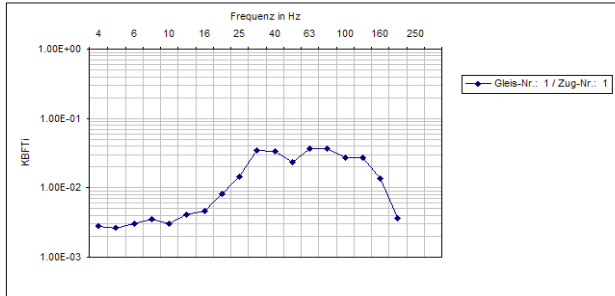
**VIBRA-2: Immissionsberechnung für Erschütterung und Körperschall**

Nach ES-Norm: DIN 41502      Transferspektren-Gruppe: ZC  
 Nach KS-Norm: BEKS      Quellspektren-Gruppe: ZC  
 KS-Berechnung nach: SBB

Erschütterung		Körperschall	
Tag:	KB <sub>F</sub> max: 0.087	Leq (1 Zug):	37.6 dBA
	KB <sub>F</sub> tm: 0.014	Leq (16h):	21.6 dBA
Nacht:	KB <sub>F</sub> max: 0.087	Leq (1 Zug):	37.6 dBA
	KB <sub>F</sub> tm: 0.006	Leq (1h):	21.6 dBA

**Beiträge der einzelnen Zugtypen:**

Geb.	Gleis	Zug	ES (KB <sub>F</sub> Ti)	KS (dBA)	Zugtyp	Fahrzeugschwerk	tags Zh	tags Länge	nachts Zh	nachts Länge	Maximale Anzahl Zh nachts
1	1	1	0.087	37.6	GZ	50	3.1	330	0.6	330	3.1



**Bild 6.7** Berechnung der Immissionen vor dem Bau

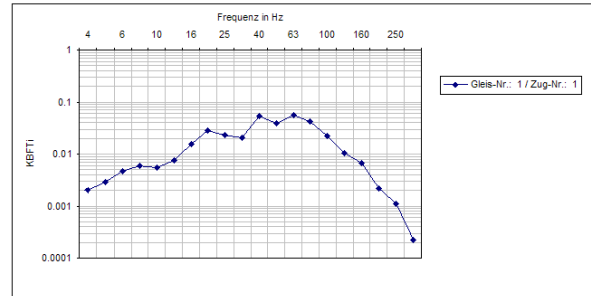
**VIBRA-2: Immissionsberechnung für Erschütterung und Körperschall**

Nach ES-Norm: DIN 41502      Transferspektren-Gruppe: ZC  
 Nach KS-Norm: BEKS      Quellspektren-Gruppe: ZC  
 KS-Berechnung nach: SBB

Erschütterung		Körperschall	
Tag:	KB <sub>F</sub> max: 0.111	Leq (1 Zug):	36.9 dBA
	KB <sub>F</sub> tm: 0.018	Leq (16h):	20.8 dBA
Nacht:	KB <sub>F</sub> max: 0.111	Leq (1 Zug):	36.9 dBA
	KB <sub>F</sub> tm: 0.008	Leq (1h):	20.8 dBA

**Beiträge der einzelnen Zugtypen:**

Geb.	Gleis	Zug	ES (KB <sub>F</sub> Ti)	KS (dBA)	Zugtyp	Fahrzeugschwerk	tags Zh	tags Länge	nachts Zh	nachts Länge	Maximale Anzahl Zh nachts
1	1	1	0.111	36.9	GZ(KG)	50	3.1	330	0.6	330	3.1



**Bild 6.8** Berechnung der Immissionen nach Erstellung des Rohbaus

In Tabelle 6.2 sind die verschiedenen Kenngrößen miteinander verglichen:

**Tabelle 6.2** Vergleich der Prognose mit Messungen

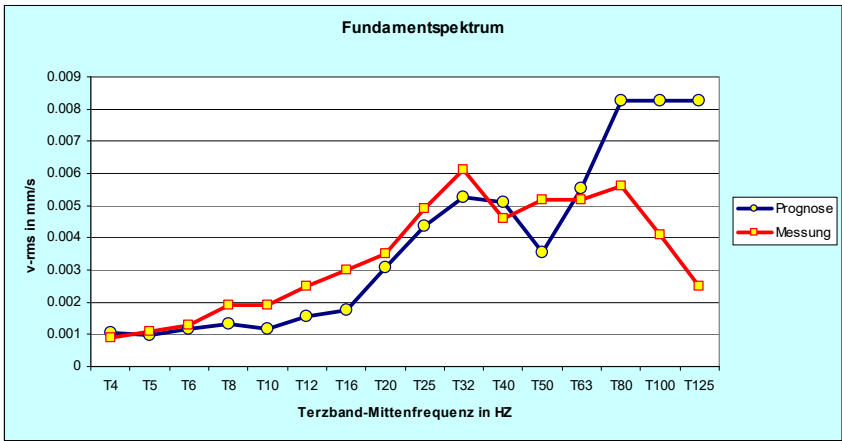
		Prognose	Messung
Erschütterung	KB <sub>F</sub> max	0.087	0.111
	KB <sub>F</sub> tm	0.014	0.018
		Prognose	Prognose basierend auf neuer Messung
Körperschall	Leq (1 Zug)	37.6 dBA	36.9 dBA
	Leq (16 h)	21.6 dBA	20.8 dBA

Der Vergleich in Tabelle 6.2 zeigt folgendes:

- Die gemessenen Erschütterungen liegen 20 bis 30 % über den prognostizierten Werten. Diese Abweichung ist in Anbetracht der inhärenten Unsicherheiten relativ gering.
- Die aufgrund der (auf dem Fussboden) gemessenen Erschütterungen berechneten Körperschall-Immissionen sind praktisch gleich gross wie die prognostizierten Werte.

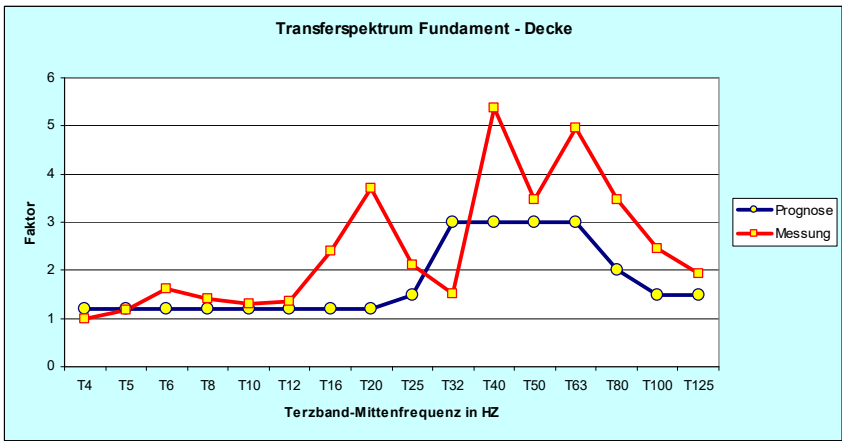
**6.2.2 Vergleich der Spektren**

Bild 6.9 zeigt die vor Baubeginn prognostizierten Fundamentalspektren im Vergleich mit den nach Fertigstellung des Rohbaus gemessenen. Die Übereinstimmung ist sehr gut, lediglich die hohen Frequenzanteile wurden etwas überschätzt.



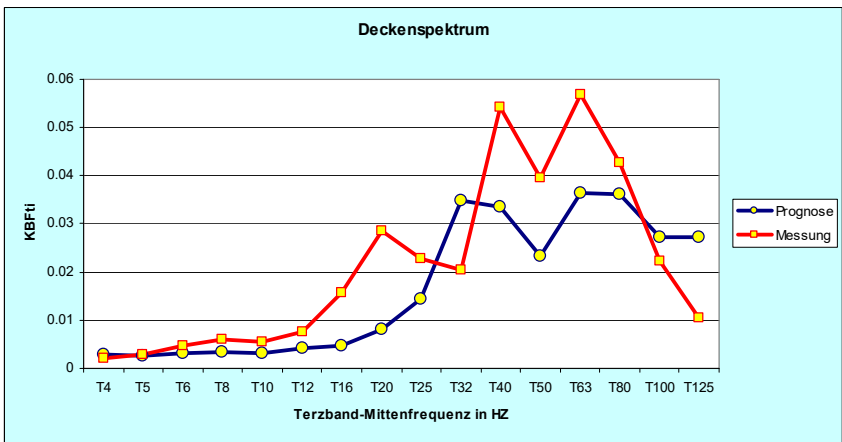
**Bild 6.9** Fundamentalspektren

Bild 6.10 zeigt das für die Prognose verwendete Transferspektrum vom Fundament zur Geschosdecke im Vergleich mit dem nach Fertigstellung des Rohbaus gemessenen. Die Übereinstimmung ist mässig, insbesondere die hohen Frequenzanteile wurden unterschätzt.



**Bild 6.10** Transferspektren Fundament - Geschosdecke

Bild 6.11 zeigt die vor Baubeginn prognostizierten Deckenspektren im Vergleich mit den nach Fertigstellung des Rohbaus gemessenen. Die Übereinstimmung ist mässig, insbesondere die hohen Frequenzanteile wurden unterschätzt.



**Bild 6.11** Deckenspektren

### 6.2.3 Beurteilung

Die durchgeführten Messungen, Auswertungen und Berechnungen führen zu folgenden Ergebnissen:

- Der Mittelwert der Erschütterungen in den Wohnungen liegt bei  $KB = 0.097$  mit einer Standardabweichung von 0.013. Solche Erschütterungen sind sehr tief. 60 % der Zugdurchfahrten liegen unterhalb der Wahrnehmungsgrenze.
- Die gemessenen Erschütterungen liegen 25 % höher als die in der Prognose berechneten Werte. Eine Abweichung von 25 % ist in Anbetracht der grossen Unsicherheiten bei den Berechnungsgrundlagen als relativ gut zu bezeichnen.
- Der abgestrahlte sekundäre Schall (sog. Körperschall) liegt für eine einzelne Zugdurchfahrt im Mittel bei 37 dBA. Tags werden Werte unter 30 dBA, nachts Werte unter 27 dBA kaum mehr wahrgenommen.
- Die gemessenen Körperschallwerte liegen 0.7 dB tiefer als die in der Prognose berechneten Werte. Diese Abweichung ist sehr gering.

Gesamthaft gesehen sind die erstellten Prognosen und die getroffenen Massnahmen als 100-prozentiger Erfolg zu werten. Die Erschütterungen sind nur schwach spürbar und die Körperschall-Immissionen dürften als schwaches aber nicht störendes Dröhnen wahrgenommen werden.

## 7 Schlussbemerkungen

Aus den durchgeführten Zuverlässigkeitsbetrachtungen und aus den beiden Fallbeispielen lässt sich folgendes entnehmen:

- Bei einer Erschütterungsprognose *ohne Messungen* ist mit einem Unsicherheitsfaktor von ca. 2 zu rechnen, d.h. der Streubereich der einfachen Standardabweichung liegt zwischen dem doppelten und dem halben Prognosewert. Die Unsicherheit bei der Körperschallprognose liegt bei ca. 6.5 dB. Es muss davon ausgegangen werden, dass auch bei einer Vergrösserung der Datenbasis für die empirische Bestimmung der Einflussfaktoren keine wesentliche Reduktion der Unsicherheit erreicht werden kann.
- Zur Verbesserung der Zuverlässigkeit einer Prognose sind alle Einflussfaktoren, die beim untersuchten Objekt irgendwie gemessen werden können, unbedingt zu messen. Durch Elimination von zwei oder drei der fünf Zufallsvariablen lässt sich die Unsicherheit in der Prognose erheblich reduzieren.
- Die Verwendung von komplexen Modellen in der Prognose führt nicht automatisch zu einer Reduktion der Unsicherheit. Nur wenn die erforderlichen Input-Daten vorliegen – und dafür sind zumeist gezielte Messungen erforderlich – bringt die Verwendung von komplexen Modellen in der Prognose von Eisenbahnerschütterungen eine Verbesserung, d.h. eine Reduktion der Unsicherheit.