

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

Marcel Birchmeier, ZC Ziegler Consultants AG, Zürich, CH

### **1 Einleitung**

Die Entstehung und Ausbreitung von Erschütterungen im Erdreich infolge Schienenverkehrs, die Übertragung der Erschütterungen auf Gebäude und Geschossdecken und die Umwandlung in hörbaren, sekundär abgestrahlten Luftschall (hier Körperschall genannt) ist mit vielen Unsicherheiten behaftet. Auch stellt jedes Gebäude wegen seiner Struktur, des Aufbaus des anstehenden Untergrunds bis hin zur Erschütterungsquelle eine einzigartige Situation dar. Ein Prognosemodell wie das Programmpaket VIBRA-1-2-3 stimmt folglich nie exakt mit der Realität überein, auch weil das Modell eine Vereinfachung darstellt und die Kennwerte der physikalischen Vorgänge teilweise nicht bekannt sind.

Es ist daher naheliegend, neben dem eigentlichen Prognosewert aus der Modellrechnung für die Erschütterungs- und Körperschallimmission in einem Gebäude eine Angabe darüber zu machen, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Prognosewert auch der Realität entspricht und wie stark dieser Prognosewert im Vergleich zur Realität streut. Ausgehend von einer kurzen Einführung zum Modell VIBRA-1-2-3 wird das Vorgehen einer umfassenden Neuauswertung bestehender Messreihen und die Resultate eines Vergleichs zwischen dem Modell VIBRA-1 und den Messresultaten präsentiert. Im Anschluss werden Empfehlungen bezüglich einer Erschütterungs- und Körperschalluntersuchung bei Eisenbahnprojekten gegeben.



**Bild 1.1** Eisenbahnstrecke durch Bruggen bei St. Gallen

## 2 VIBRA-1-2-3

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

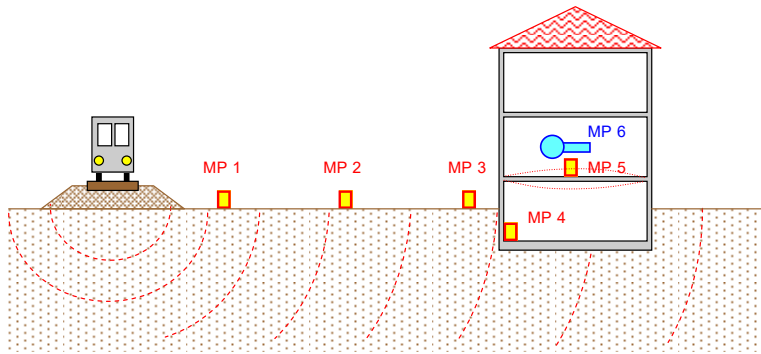
1. Eine neue Eisenbahnlinie, ein zusätzliches Gleis oder auch nur eine neue Weiche ist geplant. Bevor ein solches Projekt realisiert werden kann, ist zu prüfen, ob kein Gebäude im Nahbereich des Gleises von unzulässig hohen Immissionen betroffen ist oder wird.
2. Ein neues Wohngebäude, eine ganze Überbauung oder ein Betrieb mit hochempfindlichen Anlagen soll in der Nähe einer bestehenden Eisenbahnlinie gebaut werden. Auch hier ist zu untersuchen, ob die zukünftigen Immissionen im zulässigen Rahmen bleiben oder ob allenfalls beim Bau des projektierten Gebäudes Massnahmen zur Reduktion der Erschütterungen oder des Körperschalls getroffen werden müssen.
3. Bewohner eines bestehenden Gebäudes neben einer bestehenden Eisenbahnlinie beschwerten sich über zu starke Immissionen. Es ist zu prüfen, ob die vorhandenen Immissionen innerhalb des von den Normen vorgesehenen Rahmens liegen. Gegebenenfalls sind Massnahmen zu entwickeln, um die Immissionen zu reduzieren.

In allen drei Fällen ist ein vertieftes Verständnis der Vorgänge bei der Ausbreitung der Erschütterungen zwischen Quelle und Empfänger die Grundvoraussetzung für eine Beurteilung der Problematik. Überdies benötigt man ein Rechenmodell, mit dem die komplexen Vorgänge der Erschütterungsausbreitung mit ausreichender Genauigkeit und vertretbarem Aufwand berechnet werden können.

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

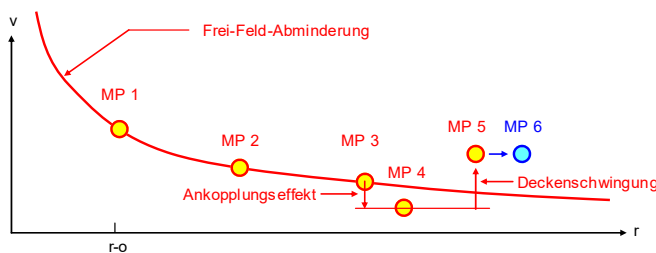
Bei VIBRA-1 handelt es sich um ein einfaches frequenz-unabhängiges Faktoren-Modell, bei VIBRA-2 um ein Terzbandspektren-Modell. Die beiden Modelle wurden durch Ziegler Consultants in Zusammenarbeit mit den SBB (Schweizerische Bundesbahnen) auf der Basis des ACCESS-Datenbanksystems als Software-Paket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

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



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

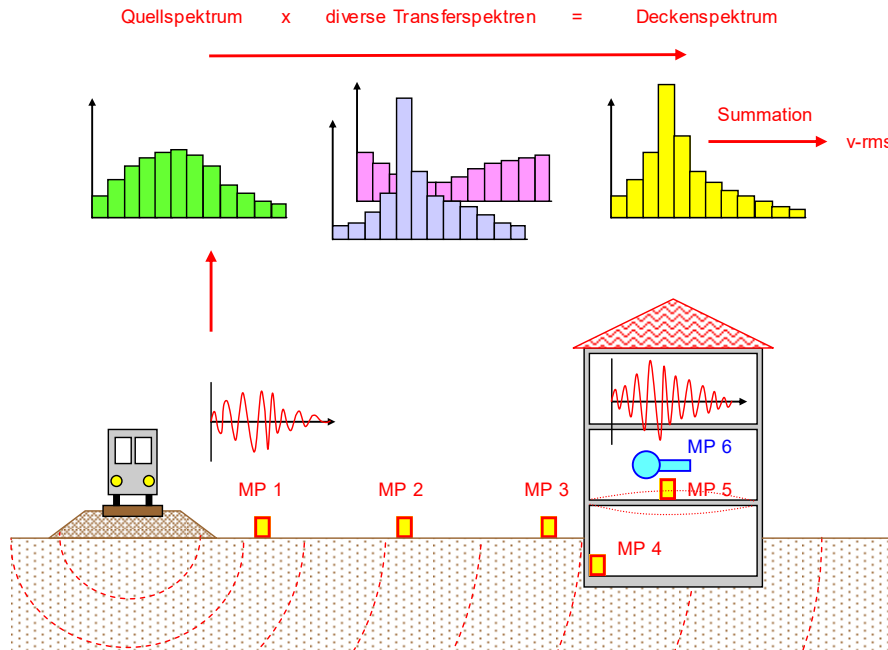
- $v$  = Schwingung beim MP 5
- $v_0$  = Schwingung bei  $r_0$
- $r_0$  = Referenzdistanz
- $r$  = Gebäuedistanz
- $m$  = Abminderungsexponent
- $F_a$  = Ankopplungsfaktor
- $F_d$  = Deckenfaktor



**Bild 2.1** Konzept für das Faktoren-Modell VIBRA-1

Dabei werden alle Einflussfaktoren wie z.B. das Abminderungsverhalten im Frei-Feld, der Ankopplungseffekt und die Verstärkung durch die Geschossdecke durch empirisch bestimmte Parameter berücksichtigt. Wichtig bei diesem Modell ist, dass erstens alle relevanten Einflussfaktoren einbezogen werden und dass zweitens jeder Parameter nur einen Aspekt abdeckt. Gesamthaft werden beim „einfachen Modell“ etwa 10 Parameter benötigt, um eine einiger-massen zuverlässige Prognose für Erschütterung und Körperschall zu erreichen.

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



**Bild 2.2** Konzept für das Terzbandspektren-Modell VIBRA-2

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

### 3 Vorgehen bei der Bestimmung der Parameter für VIBRA-1

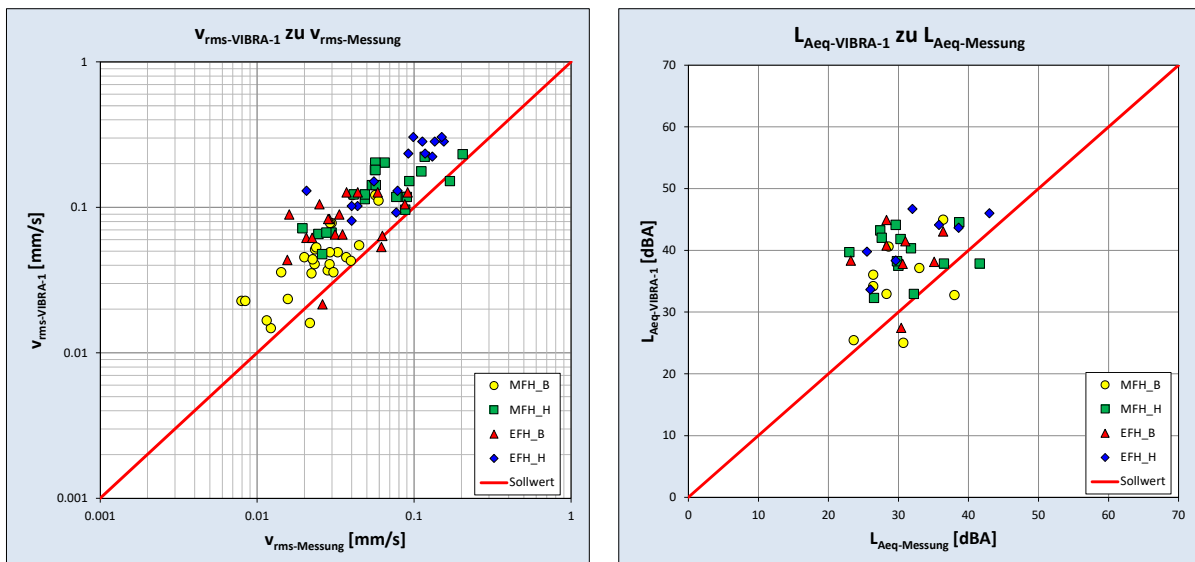
Bei einem Eisenbahnprojekt sind im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung immer auch die durch die Bahn verursachten Erschütterungs- und Körperschallimmissionen in bewohnten Gebäuden zu untersuchen. Hierzu werden die Immissionen im Ist-Zustand und im Projekt-Zustand anhand eines Modells wie VIBRA-1 abgeschätzt und mit den gültigen Richtwerten verglichen. Falls bei einem oder mehreren Gebäuden Überschreitungen erwartet werden, sind Messungen durchzuführen um das Modell zu verifizieren oder darauf aufbauend eine Immissionsprognose für den Projekt-Zustand anhand eines Modells wie VIBRA-2 zu erstellen.

Anhand der VIBRA-1-Resultate wird festgelegt, in wie vielen und in welchen Gebäuden Messungen vorgenommen werden müssen. Werden nun in VIBRA-1 sehr konservative Parameter verwendet, müssten prinzipiell häufiger Messungen durchgeführt werden als bei der Verwendung eines weniger konservativen Parametersatzes. Der Aufwand für eine Erschütterungs- und Körperschalluntersuchung würde unverhältnismässig gross. Diese Problematik wird zusätzlich dadurch verschärft, dass seitens Bewilligungsbehörden wegen der Streuung der tatsächlich gemessenen Immissionswerten gegenüber der Modellrechnung ein zusätzlich zu berücksichtigender Sicherheitsfaktor von 2 (entspricht 6 dB beim Schall) verlangt wird. Weiter werden auch vertiefte Abklärungen inkl. Messungen verlangt, wenn bereits im Ist-Zustand die mit dem Sicherheitsfaktor beaufschlagten Immissionswerte die Richtwerte überschreiten, selbst dann, wenn im Rahmen des entsprechenden Bahnprojekts keine Immissionszunahme zu erwarten oder an der Bahninfrastruktur keine baulichen Veränderungen vorgesehen sind.

Wie sich schon bei verschiedenen Projekten der SBB gezeigt hat, war der bis anhin von den SBB zur Verfügung gestellte Parametersatz sehr konservativ. Um dies aufzuzeigen wurde

ausgehend von den zwischen 2001 und 2014 von Ziegler Consultants in VIBRA-3 erfassten 240 Messreihen eine VIBRA-1-Berechnung für jedes dieser Gebäude mit den entsprechenden Parametern durchgeführt. Dabei wurde jeweils der mittlere RMS-Wert der Erschütterung ( $v_{rms}$  in mm/s) und der mittlere Vorbeifahrtspegel ( $L_{Aeq}$  in dBA) in einem Raum im Gebäude während einer Zugdurchfahrt bestimmt. Es wird unterschieden zwischen Mehrfamilienhäuser (MFH) und Einfamilienhäuser (EFH) mit Beton- oder Holzdecken (B bzw. H).

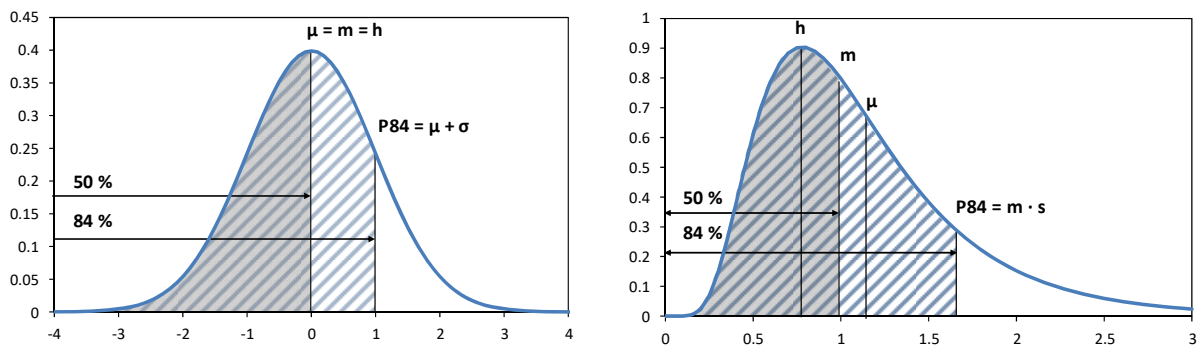
Bild 3.1 zeigt eine Gegenüberstellung der mit VIBRA-1 berechneten Immissionswerte (mit bisherigem Parametersatz SBB, ohne Sicherheitsfaktor) und der tatsächlich gemessenen Immissionswerte. Bei fast allen Fällen war die Prognose auf der sicheren Seite. Das Berücksichtigen eines zusätzlichen Sicherheitsfaktors wegen der Streuung der Modellrechnung wäre z.B. im Fall Einfamilienhäuser mit Holzdecken (EFH\_H) klar nicht erforderlich. Dieser Vergleich zeigt, dass der Parametersatz so definiert werden sollte, dass der Prognosewert im Mittel den tatsächlich vorhandenen Immissionen entspricht („best estimate“). Auch ist erst dann die Angabe über die Streubreite sinnvoll.



**Bild 3.1** Vergleich  $v_{rms}$  in Deckenmitte (links) und  $L_{Aeq}$  (rechts) zwischen Messung (x-Achse) und VIBRA-1 mit bisherigem Parametersatz SBB (y-Achse)

Für eine statistische Auswertung von Daten wie in Diagramm 3.1 ist es sinnvoll, bei der Erschütterung die Abweichung zwischen Messung und Berechnung als Faktor „Messung / Berechnung“ zu definieren, beim Körperschall als Differenz „Messung - Berechnung“. Ein Faktor  $> 1$  bzw. eine Differenz  $> 0$  dB bedeutet, dass die Messung höhere Immissionswerte ergeben hat als mit VIBRA prognostiziert wurde, d.h. dass die Berechnung auf der unsicheren Seite gelegen wäre.

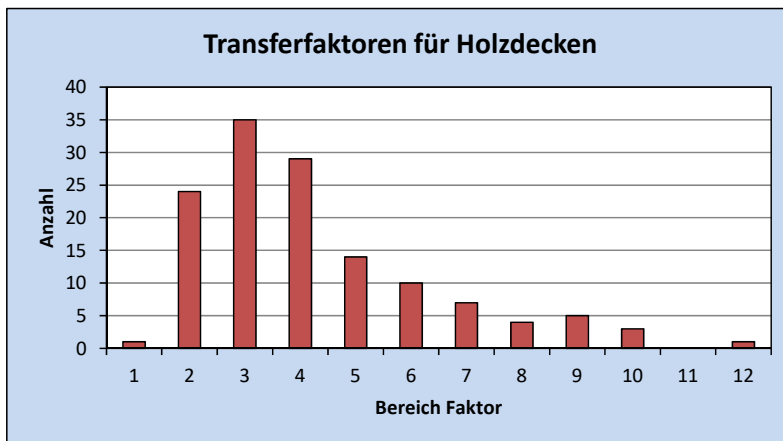
Da die Erschütterungs-/Körperschallübertragung mit Hilfe von Transferfaktoren oder Transferspektren ein multiplikativer Vorgang darstellt, wird angenommen, dass der Faktor bei der Erschütterung lognormalverteilt und die Differenz beim Körperschall wegen der bereits logarithmischen Skala normalverteilt ist (siehe Bild 3.2). Bei einer Normalverteilung gilt, dass 50 % aller Werte kleiner sind als der Mittelwert  $\mu$  und dass 84 % aller Werte kleiner sind als die Summe aus arithmetischem Mittelwert  $\mu$  und Standardabweichung  $\sigma$ . Bei der Lognormalverteilung gilt analog, dass 50 % aller Werte kleiner sind als der Median  $m$  (entspricht auch dem geometrischen Mittelwert) und dass 84 % aller Werte kleiner sind als das Produkt aus Median  $m$  und Streufaktor  $s$ .



**Bild 3.2** Dichtefunktion der Normalverteilung (links, mit  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 1$ ) und der Lognormalverteilung (rechts, mit  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 0.5$ ) mit  $\mu$  = arithmetischer Mittelwert,  $m$  = Median,  $h$  = Häufungspunkt,  $P84 = 84\%$ -Perzentile,  $\sigma$  = Standardabweichung und  $s$  = Streufaktor.

Auch bei der Bestimmung der Parameter für VIBRA-1-2 muss entsprechend vorgegangen werden. Bild 3.3 zeigt als Beispiel das Histogramm für die gemessenen Verstärkungsfaktoren von 133 verschiedenen Holzdecken (Verstärkung der Erschütterung vom Fundament zur Deckenmitte). Es zeigt sich klar, dass die gemessenen Verstärkungsfaktoren ebenfalls lognormalverteilt sind. Um nun mit VIBRA einen Prognosewert zu erhalten, der in 50 % aller Fälle grösser oder gleich dem tatsächlich vorhandenen Immissionswert entspricht, muss auch beim Verstärkungsfaktor der Median bestimmt und als entsprechender Parameter in VIBRA eingesetzt werden. Diese Vorgehensweise gilt auch für alle anderen Parameter in VIBRA.

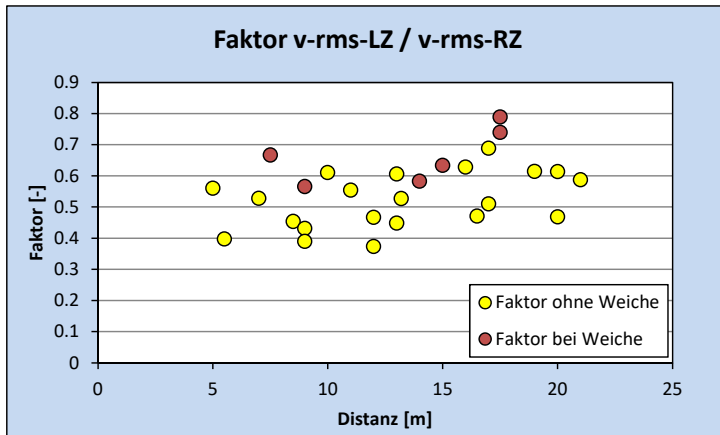
Der Median der in Bild 3.3 dargestellten Daten beträgt 3.76, der entsprechende, von den SBB zur Verfügung gestellte Parameter hat hingegen einen Wert von 8. Dies ist der Hauptgrund, warum die mit VIBRA berechneten Erschütterungen auf Holzdecken wie in Bild 3.1 dargestellt fast ausschliesslich auf der sicheren Seite liegen.



**Bild 3.3** Verteilung der gemessenen Verstärkungsfaktoren für Holzdecken

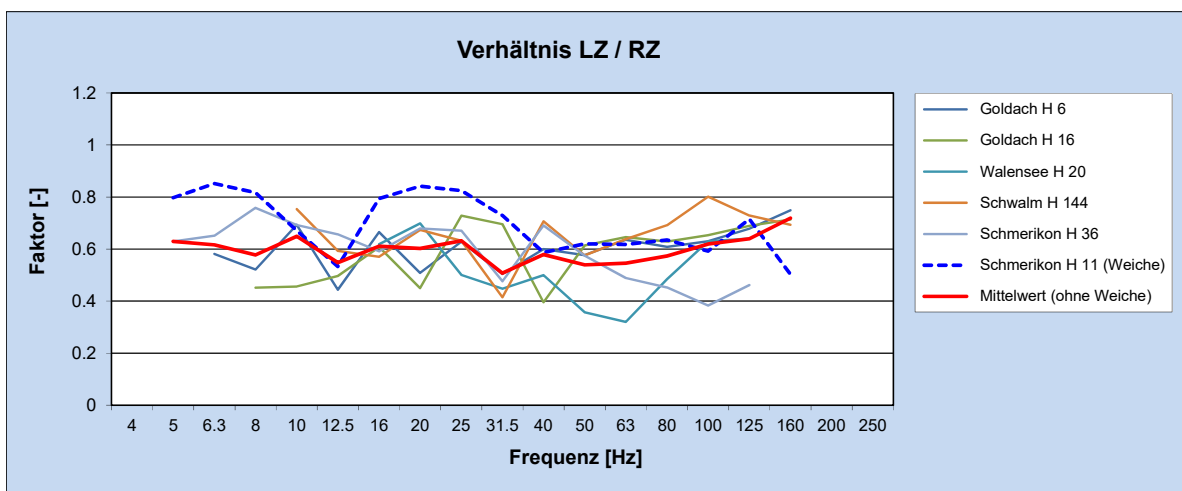
Um mit dem Modell möglichst nahe an die Realität zu kommen, sollte neben der Ausbreitungscharakteristik und den Transferfaktoren auch die Ausgangsgrösse im Modell – die Erschütterung neben dem Gleis – möglichst genau bekannt sein. Hier spielt neben der Distanz zum befahrenen Gleis, der Position von Weichen und der Fahrgeschwindigkeit auch der Zugtyp eine Rolle. Als Beispiel seien hier Leichtbauzüge, wie z.B. FLIRT von Stadler-Rail, erwähnt, die geringere Erschütterungen als normale Reisezüge verursachen. Bild 3.4 zeigt für mehrere Messreihen den Unterschied der beiden Zugtypen in Abhängigkeit der Distanz zwischen Gleis und Messpunkt. Der mittlere Faktor beträgt 0.55 (ohne und mit Weichenüber-

fahrt). Ohne Weichenüberfahrt beträgt der Faktor 0.52, mit Weichenüberfahrt 0.66. Ein Trend bei der Distanzabhängigkeit ist nicht erkennbar. Da vor allem bei Weichen die grössten Immissionen in einem nahen Gebäude zu erwarten sind, sollten Leichtbauzüge nicht unterschätzt werden.



**Bild 3.4** Verhältnis zwischen Leichtbauzüge (LZ) und normalen Reisezügen (RZ) in Abhängigkeit der Distanz zum Gleis

Bild 3.5 zeigt das Verhältnis zwischen den gemessenen Terzbandspektren (jeweils gemittelt über die Zugsvorbeifahrten der entsprechenden Zugskategorie). Für den dargestellten Mittelwert wurde die Messung in Schmerikon mit Weichenüberfahrt (H 11) nicht berücksichtigt. Es zeigt sich, dass Leichtbauzüge über den gesamten Frequenzbereich weniger Erschütterungen verursachen. Es sei hier angemerkt, dass die Anzahl Messungen sehr gering ist, insbesondere bei einer Weichenüberfahrt.

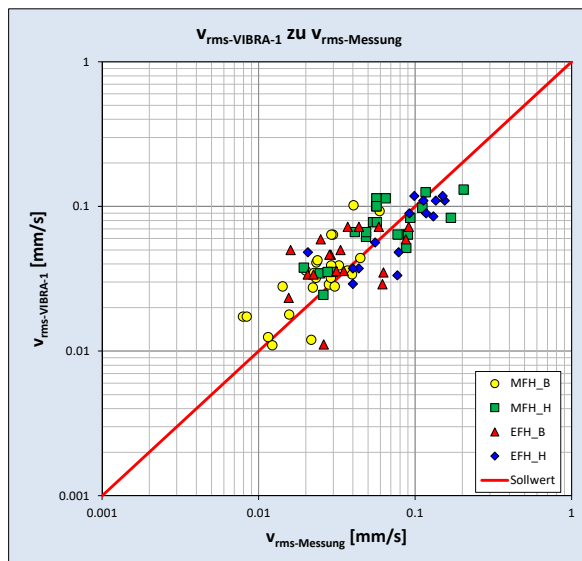


**Bild 3.5** Verhältnis zwischen Leichtbauzüge (LZ) und normalen Reisezügen (RZ)

## 4 Vergleich Modell – Messung

Aufgrund einer möglichst kompletten Auswertung von den 240 verschiedenen Messreihen (Messungen zwischen 2001 und 2014) und einer Kalibrierung des Modells anhand eines Vergleichs zwischen Modellrechnung und den Messwerten wurde ein Parametersatz ZC2015 definiert, der als Grundlage für die Definition des neuen Parametersatzes SBB2015 dient, der von den SBB für die Projektbearbeitung zur Verfügung gestellt werden wird. Der neue Parametersatz SBB2015 wird weitgehend dem Parametersatz ZC2015 entsprechen.

Bild 4.1 und 4.2 zeigen die Gegenüberstellung der mit VIBRA-1 berechneten Immissionswerte (ohne Sicherheitsfaktor) und der tatsächlich gemessenen Immissionswerte und die statistische Auswertung des Faktors „Messung / Berechnung“ bei den Erschütterungen und der Differenz „Messung - Berechnung“ beim Körperschall. Während bei den Erschütterungen die VIBRA-Berechnung über alle Gebäudekategorien leicht auf der sicheren Seite ist (Median von 0.87), entspricht sie beim Körperschall ziemlich genau den Messwerten (Mittelwert von -0.27 dB). Interessant sind auch die Fraktilewerte, z.B. P90 von 1.542 über alle Gebäudekategorien. Dieser Wert bedeutet, dass der mit 1.542 multiplizierte Erschütterungswert aus VIBRA-1 in 90 % aller Fälle grösser ist, als die tatsächlich vorhandenen Erschütterungsimmissionen. Analog muss zu den Körperschallimmissionen aus VIBRA-1 7.07 dB dazugezählt werden, um in 90 % aller Fälle auf der sicheren Seite zu sein.



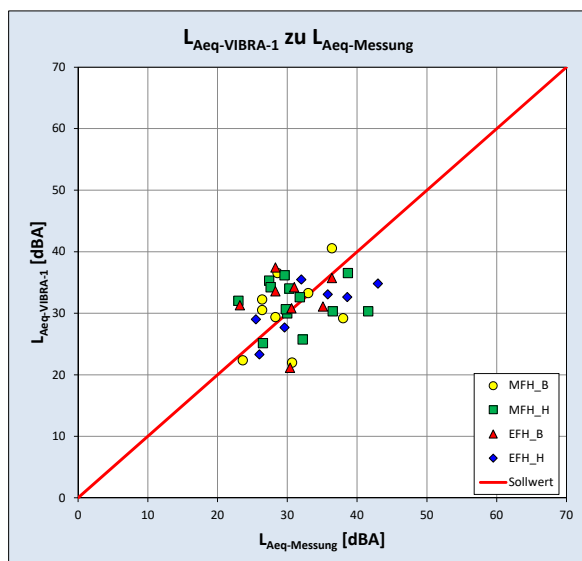
Statistische Auswertung der lognormalverteilten Variable "Faktor"

	MFH_B	MFH_H	EFH_B	EFH_H	Alle
Mittelwert	0.78	0.96	0.97	1.24	0.96
Anzahl	26	23	18	15	82
> 1	6	9	5	12	32
Min	0.40	0.50	0.32	0.43	0.32
Max	1.82	2.03	2.35	2.31	2.35

Schätzwerte für die Parameter der lognormalverteilten Variable "Faktor"

	MFH_B	MFH_H	EFH_B	EFH_H	Alle
Häufungspunkt	0.64	0.75	0.61	1.02	0.71
Median	0.73	0.89	0.83	1.17	0.87
Mittelwert	0.78	0.96	0.97	1.26	0.96
Streu faktor	1.45	1.50	1.74	1.45	1.57
P84	1.061	1.334	1.443	1.699	1.358
P90	1.178	1.497	1.688	1.886	1.542
P95	1.349	1.736	2.064	2.157	1.816
P99	1.742	2.294	3.017	2.778	2.473

**Bild 4.1** Diagramm: Vergleich  $v_{rms}$  in Deckenmitte zwischen Messung (x-Achse) und VIBRA-1 mit neuem Parametersatz ZC2015 (y-Achse), Tabelle: Statistische Auswertung des Faktors  $v_{rms-Messung} / v_{rms-VIBRA-1}$



Statistische Auswertung der normalverteilten Variable "Differenz"

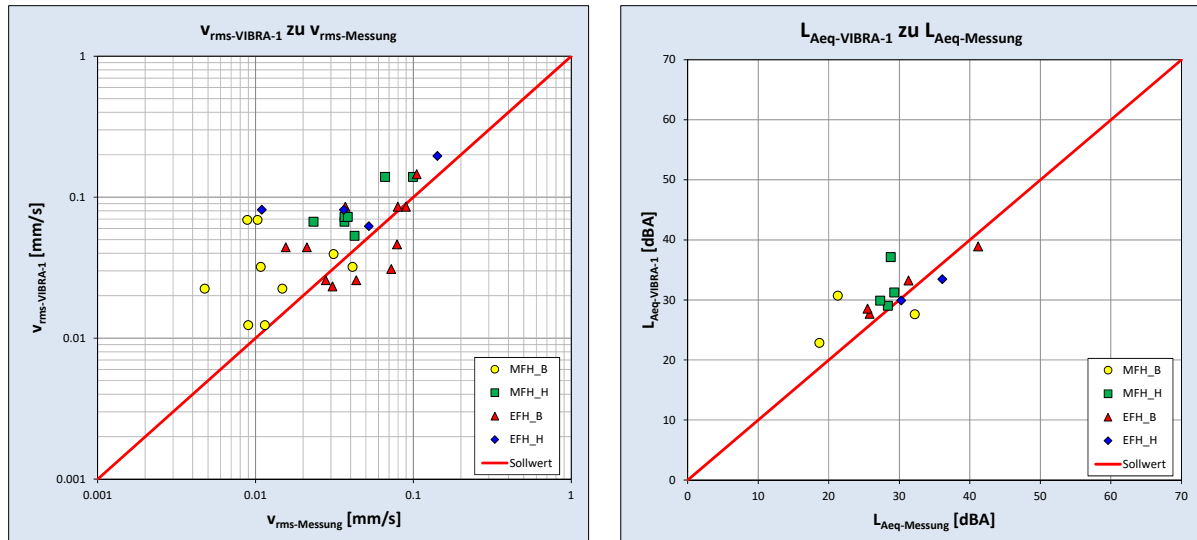
	MFH_B	MFH_H	EFH_B	EFH_H	Alle
Mittelwert	-0.51	-0.60	-1.50	2.08	-0.27
Anzahl	9	13	8	7	37
> 0	3	6	3	5	17
Min	-7.90	-9.02	-9.13	-3.52	-9.13
Max	8.81	11.30	9.25	8.19	11.30
Stdabw	5.97	6.16	6.23	4.39	5.72
COV	-11.75	-10.19	-4.16	2.11	-21.48
P84	5.46	5.55	4.73	6.46	5.46
P90	7.15	7.29	6.49	7.70	7.07
P95	9.32	9.53	8.75	9.29	9.15
P99	13.41	13.74	13.01	12.29	13.07

**Bild 4.2** Diagramm: Vergleich  $L_{Aeq}$  zwischen Messung (x-Achse) und VIBRA-1 mit neuem Parametersatz ZC2015 (y-Achse), Tabelle: Statistische Auswertung der Differenz  $L_{Aeq-Messung} - L_{Aeq-VIBRA-1}$

Anhand von aktuellen Messreihen (Messungen zwischen 2015 und 2016), die nicht bei der Definition und Kalibrierung des neuen Parametersatzes benutzt wurden, kann das Modell



validiert werden. Es wurde wiederum für jedes gemessene Gebäude eine VIBRA-1-Berechnung durchgeführt und die Resultate den Messwerten gegenübergestellt (siehe Bild 4.3). Es zeigt sich im Vergleich zur oben abgebildeten Gegenüberstellung in etwa dasselbe Resultat, obwohl bei der Validierung bei der VIBRA-Berechnung dank besserer Datengrundlage die Verkehrszusammensetzung und die Fahrgeschwindigkeit genauer berücksichtigt werden konnten. Es sei hier angemerkt, dass die Anzahl Messreihen noch zu gering ist, um eine zuverlässige Aussage machen zu können.



**Bild 4.3** Vergleich  $v_{rms}$  in Deckenmitte (links) und  $L_{Aeq}$  (rechts) zwischen Messung (x-Achse) und VIBRA-1 mit neuem Parametersatz ZC2015 (y-Achse)

## 5 Empfehlungen bezüglich Bearbeitung von Bahnprojekten

Für die Abklärung des Problemkreises Erschütterungs- und Körperschallimmissionen infolge Schienenverkehrs soll grundsätzlich wie folgt vorgegangen werden:

- Schritt 1: Erfassung der Gebäude und Berechnung der Immissionen (Erschütterung und Körperschall) für alle Gebäude im Korridor von 50 m beidseits der Gleise. Es werden bei jedem Gebäude dessen spezifische Gegebenheiten wie u.a. Gebäudetyp (Grösse des Gebäudes, Bauart), Gleisabstand, Weichenabstand berücksichtigt. Mit den Ergebnissen aus VIBRA-1 lassen sich diejenigen Gebäude erkennen, bei denen eine Überschreitung der Richtwert zu erwarten ist.
- Schritt 2: Messung der Immissionen in kritischen Gebäuden mittels kombinierter Erschütterungs- und Körperschallmessungen.
- Schritt 3: Verifizieren der VIBRA-1-Prognose und falls nötig verbesserte Prognose mittels VIBRA-2 unter Berücksichtigung der neuen Messdaten.
- Schritt 4: Falls erforderlich: Erstellung entsprechender Massnahmenvorschläge und Prognostizieren der Wirkung.

Um einerseits zu gewährleisten, dass sowohl Messresultate wie auch Prognoserechnung konsistent sind und richtig interpretiert werden und andererseits die Verantwortlichkeiten klar definiert sind, ist es zwingend erforderlich, dass die gesamte Erschütterungs- und Körper-

schall-Untersuchung durch ein und denselben Fachspezialisten durchgeführt wird. Dies beinhaltet das Durchführen aller vier obengenannten Schritte inklusive eines Vorschlags von Gebäuden, wo In-situ-Messungen durchgeführt werden sollen.

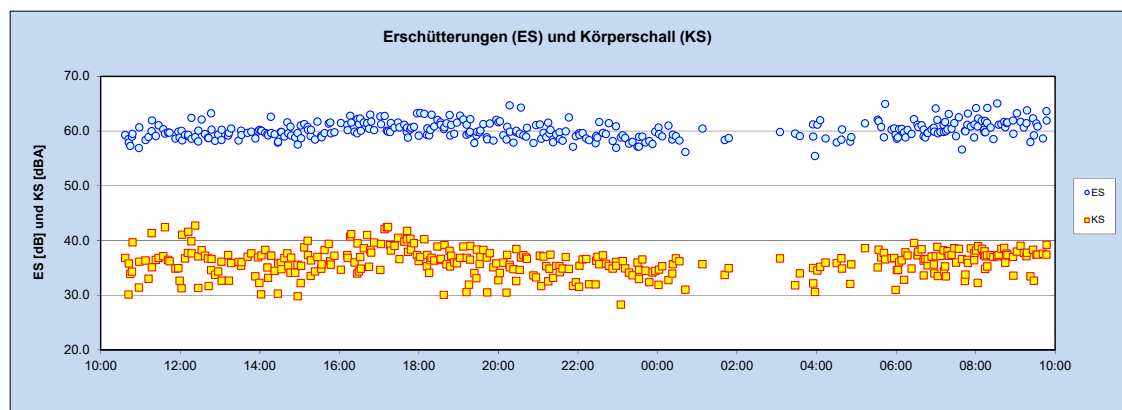
Eine saubere und immer gleiche Durchführung der Messung ist eine Grundvoraussetzung für aussagekräftige Auswertungen und somit für die Weiterentwicklung von VIBRA. Zudem können so Resultate von verschiedenen Messkampagnen miteinander verglichen werden, was für die Interpretation von Messresultaten wichtig ist. Bei einer kombinierten Erschütterungs- und Körperschallmessung werden die Messpunkte im Allgemeinen wie folgt angeordnet:

**Tabelle 5.1** Messorte bei kombinierter Erschütterungs- und Körperschallmessung

Messort	Beschreibung der
1 Messpunkt im Frei-Feld neben Gleis	Quelle, Ausbreitung
1 Messpunkt im Frei-Feld neben Gebäude	
1 Messpunkt am Fundament im Gebäude	Ankopplung Gebäude
2 Messpunkte auf repräsentativen Geschossdecken	Verstärkung Decken
1 Schallmesspunkt in einem repräsentativen Raum	Umwandlung Erschütterung - Körperschall

Durch diese Messanordnung ist es möglich, die Messresultate und die Resultate der VIBRA-1-Berechnung miteinander zu vergleichen und Unregelmässigkeiten zu erkennen. Die Messung im Frei-Feld ist zudem erforderlich, um die Resultate auf andere Gebäude (in denen keine Messung durchgeführt wurde) übertragen und die Wirkung von allfälligen immissionsreduzierenden Massnahmen an den Gleisen miteinbeziehen zu können.

Die Messung sollte während 24 Stunden erfolgen. Einerseits weil die Immissionen von Zügen in der Nacht von den Anwohnern generell als störender empfunden werden als von Zügen am Tag und andererseits weil die Immissionen nicht zu allen Tages- und Nachtzeiten gleich stark sind. Bild 5.1 zeigt die Erschütterungs- und Körperschallimmissionen in einem Raum während 24 Stunden. Es ist eine klare Erhöhung der Immissionen zwischen 16 und 18 Uhr ersichtlich. Grund dürften längere Züge und älteres Rollmaterial sein, das während der Hauptverkehrszeit eingesetzt wurde. In Tabelle 5.2 sind die Immissionswerte aufgelistet, die sich je nach berücksichtigtem Zeitabschnitt ergeben. Bei den Erschütterungen betragen die Unterschiede im Vergleich zur Messung über 24 Stunden bis 16 %, beim Körperschall 2.5 dB.



**Bild 5.1** Erschütterungs- und Körperschallimmissionen in einem Gebäude während 24 Stunden

**Tabelle 5.2** Immissionswerte am Tag über unterschiedliche Zeitdauer

Uhrzeit	Dauer	Anzahl Züge	KB <sub>FTTr</sub>	L <sub>Aeq</sub>
10:37-22:00 und 06:00-09:47	15.2 h	270	0.036	26.1 dBA
11:00-15:00	4 h	64	0.030	24.2 dBA
16:00-18:00	2 h	36	0.040	28.6 dBA

Eine Messung der Erschütterungen und auch des Körperschalls während 24 Stunden stösst bei den Hausbewohnern trotz allfälliger Einschränkungen wegen der Messeinrichtung auf relativ grosse Akzeptanz, da genau diejenigen physikalischen Grössen (Erschütterung und Körperschall) von den am meisten störenden Zügen in der Nacht gemessen werden. Wichtig ist, dass während der Messung der Bahnverkehr repräsentativ ist.

Neben einer sauberen Durchführung der Messung ist auch eine möglichst vollständige Dokumentation unerlässlich, damit die Messdaten für Auswertungen auch zu einem späteren Zeitpunkt nachvollziehbar sind. Zur Dokumentation gehören u.a. Positionen der Messpunkte, Distanz zu allfälligen Weichen, Zugtypen, Gleisbelegung und Fahrgeschwindigkeit. Insbesondere für die Dokumentation der einzelnen Zugvorbeifahrten bietet sich eine Videoaufzeichnung an.

Eine Erschütterungs- und Körperschalluntersuchung sollte möglichst effizient und kostensparend sein, da hierfür oftmals öffentliche Gelder eingesetzt werden. Daher kann es je nach Fragestellung und in vom Fachspezialisten zu begründenden Fällen sinnvoll sein, das Vorgehen auch bei der Messung anzupassen. Dabei sollte aber die Qualität der Ingenieurarbeit nicht beeinträchtigt werden. Folgend einige Empfehlungen, die ohne Qualitätseinbussen den Aufwand reduzieren können:

- In Streckenabschnitten bei denen im Rahmen des zu bearbeitenden Projekts keine Eingriffe am Gleis vorgesehen sind (auch keine Oberbauerneuerung) und sich der Betrieb nur geringfügig verändert, kann eine VIBRA-1-Berechnung ohne Messung ausreichend sein. Die Erschütterungs- und Körperschalluntersuchung inklusive allfälliger Messungen muss dann aber fortgesetzt werden, sobald bei den entsprechenden Abschnitten bauliche Eingriffe vorgesehen sind.
- In Streckenabschnitten bei denen im Rahmen des zu bearbeitenden Projekts keine Eingriffe am Gleis vorgesehen sind (auch keine Oberbauerneuerung), sich der Betrieb jedoch wesentlich verändert (Zunahme grösser 20 % bei den Erschütterungen, d.h. 1.6 dB beim Körperschall), kann eine VIBRA-1-Berechnung inklusive Messung zur Verifikation der Prognose ausreichend sein. Bei solchen Messungen kann die Anzahl Messpunkte auf die Messpunkte im Gebäude reduziert werden.
- Mit einer fachmännischen Beurteilung der Resultate aus VIBRA-1 kann die Anzahl Gebäude, bei denen Messungen durchgeführt werden, optimiert werden. Hierzu gehört auch, im Zweifelsfall dort Messungen vorzusehen, wo die Unsicherheit im Modell aufgrund einer speziellen Situation (z.B. bei Hochhäusern) und fehlender Erfahrungswerte grösser ist als sonst.

- Oftmals ist zur Bearbeitung einer Untersuchung nur die Gesamtimmissionen (Mittel über alle Zugtypen über einen bestimmten Zeitraum) entscheidend und nicht die auf Zugtypen aufgegliederten Immissionen. Hier sollten zwar die einzelnen Zugvorbeifahrten dokumentiert werden, auf eine vertiefte Auswertung kann aber im Rahmen des Projekts verzichtet werden.
- Mit Hilfe einer VIBRA-1-Berechnung der Immissionen für ein allgemeines Gebäude kann ein kritischer Abstand zum Gleis bestimmt werden, so dass mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeit alle baugleichen Gebäude mit grösserem Abstand keine Überschreitung der Immissionsrichtwerte aufweisen. Mit diesem Vorgehen kann der Projektperimeter eingeschränkt werden, was insbesondere bei grossen Projekten die Anzahl der in der VIBRA-1-Untersuchung zu berücksichtigenden Gebäude zum Teil wesentlich reduziert.

## 6 Schlussbemerkung

Mit Hilfe eines Vergleichs zwischen den mit VIBRA-1 prognostizierten und den tatsächlich gemessenen Immissionswerten konnte aufgezeigt werden, dass der bis anhin von den SBB zur Verfügung gestellte Parametersatz klar zu konservative Resultate lieferte. Mit einem auf statistischen Auswertungen basierten und kalibrierten Parametersatz ergeben sich mit VIBRA-1 nun Immissionswerte, die in etwa in 50 % aller Fälle grösser sind als die tatsächlich vorhandenen Immissionen. Ebenfalls konnte die Streuung beschrieben werden. Mit dem neuen Parametersatz dürfte sich bei einer Erschütterungs- und Körperschalluntersuchung bei einem Eisenbahnprojekt die Anzahl der durchzuführenden Messungen in Gebäuden klar reduzieren, ohne dass dabei Gebäude mit relativ starken Immissionen übersehen werden.

Mit der Anwendung des neuen Parametersatzes verschwinden versteckte Sicherheiten. Hingegen lässt sich nun die Streuung der Resultate gegenüber den tatsächlich vorhandenen Immissionen beschreiben und Angaben zu den Wahrscheinlichkeiten machen. So entspricht der seitens Bewilligungsbehörden vorgegebene Sicherheitsfaktor von 2 (entspricht 6 dB beim Körperschall) bei den Erschütterungen in etwa dem 97%-Fraktilwert, d.h. in 97 % aller Fälle sind die prognostizierten Immissionen grösser als die tatsächlich gemessenen Werte. Beim Körperschall entspricht der um 6 dB erhöhte Wert in etwa dem 86%-Fraktilwert.

Das Modell VIBRA-1-2-3 macht Vereinfachungen, ohne die jedoch ein effizientes Arbeiten bei der hochkomplexen Fragestellung der Erschütterungsausbreitung vom fahrenden Zug bis in ein Gebäude hinein nicht möglich wäre. Dank breiter Datenbasis ist die Unsicherheit im Modell bekannt und kann entsprechend der Fragestellung mitberücksichtigt werden. Bei speziellen Situationen, z.B. bei einem Hochhaus, ist die Datenbasis aber noch relativ gering, die Unsicherheit entsprechend grösser. Es ist daher wichtig, auch in Zukunft die Erkenntnisse aus den Messungen zu sammeln und ins Modell einfliessen zu lassen.