

**Information**

**Körperschall/Erschütterungen**



# **Körperschall- und Erschütterungsschutz**

## **Leitfaden für den Planer**

**Beweissicherung,**

**Prognose,**

**Beurteilung und**

**Schutzmaßnahmen**

(Ausgabe: August 1996)

(Berichtigt: Februar '99)

Deutsche Bahn AG  
TZF 12 München

Anschrift: DB Systemtechnik -TZF12, Völckerstr. 5, 80939 München  
Tel...: 089/1308 5609 H. Fischer  
030/297 57186 H. Garburg  
030/297 57187, H. Wächter  
089/1308 5273 H. Dr. Degen

## Inhaltsübersicht

- 1. Einleitung**
- 2. Begriffe**
- 3. Messungen und Auswertungen von Körperschall und Erschütterungen**
  - 3.1 Meßvorschriften und Grundlagen
  - 3.2 Meßgrößen, Meßpunkte und Meßrichtungen bei Beweissicherungsmessungen
  - 3.3 Auswertungsmethoden
- 4. Berechnungsgrundlagen von Erschütterungsprognosen**
  - 4.1 Definition der Ausgangsgrößen
    - 4.1.1 Erschütterungs-Emissionspegel  $L_E(f)$
    - 4.1.2 Entfernungsbedingte Pegelabnahme im Erdboden  $\Delta L_B(f)$
    - 4.1.3 Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren  $\Delta L_G(f)$
  - 4.2 Berechnungsgrundlagen von Erschütterungs- Immissionen**
    - 4.2.1 Körperschall - Schnellepegel  $L_v$
    - 4.2.2 KB -Werte
    - 4.2.3 Sekundärer Luftschallpegel
  - 4.3 Beschaffung der Ausgangsdaten für Berechnungen**
    - 4.3.1 Bestehendes Wohngebiet ohne Vorbelastung
      - 4.3.1.1 Erschütterungs-Emissionspegel  $L_E(f)$
      - 4.3.1.2 Entfernungsbedingte Pegelabnahme im Erdboden  $\Delta L_B(f)$
      - 4.3.1.3 Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren
    - 4.3.2 Bestehende Wohngebiete mit Vorbelastung
      - 4.3.2.1 Erschütterungs-Emissionspegel  $L_E(f)$
      - 4.3.2.2 Entfernungsbedingte Pegelabnahme  $\Delta L_B(f)$
      - 4.3.2.3 Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren  $\Delta L_G(f)$
    - 4.3.3 Geplante Bebauung an bestehenden Bahnstrecken
      - 4.3.3.1 Erschütterungs-Emissionspegel  $L_E(f)$
      - 4.3.3.2 Entfernungsbedingte Pegelabnahme  $\Delta L_B(f)$
      - 4.3.3.3 Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren
- 5. Praktische Hinweise und Beispiele zur Erstellung von Erschütterungsprognosen**
  - 5.1 Erfassung der Istsituation und der Prognosesituation
  - 5.2 Beispiele
  - 5.3 Auflagen für eine erschütterungstechnische Gesamtuntersuchung
    - 5.3.1 Vorbemerkung
    - 5.3.2 Erfassung des Istzustandes im Rahmen einer Beweissicherungsmessung

- 5.3.2.1 Anzuwendende Richtlinien
- 5.3.2.2 Allgemeingültige Forderungen zum Meßumfang
- 5.3.2.3 Auswertung und Darstellung der Meßgrößen
- 5.3.2.4 Meßbericht
- 5.3.3 Auflagen zur Erstellung einer Erschütterungsprognose
- 5.3.3.1 Grundlagen der weiterführenden Untersuchungen

## **6. Beurteilung der Erschütterungen und des sekundären Luftschalls, Normen und Richtlinien**

- 6.1 Allgemeines, Rechtslage
- 6.2 Beurteilung von Erschütterungs-Immissionen (KB-Werte)
  - 6.2.1 Vorgehensweise bei NBS-Strecken ohne Vorbelastung
  - 6.2.2 Vorgehensweise bei NBS- bzw. ABS-Streckenabschnitten mit Vorbelastung
- 6.3 Beurteilung des „Sekundären Luftschalls“

## **7. Körperschallschutzmaßnahmen**

- 7.1 Elastische Lagerung des Oberbaus
  - 7.1.1 Unterschottermatten
  - 7.1.2 Masse-Feder-Systeme
- 7.2 Elastische Schienenlagerung
  - 7.2.1 Elastische Schienenbefestigung
  - 7.2.2 Kontinuierliche Schienenlagerung
  - 7.2.3 Elastische Schwellenlagerung
- 7.3 Vergleich von Oberbauarten (Feste Fahrbahn / Schotteroberbau)
- 7.4 Maßnahmen im Ausbreitungsweg
- 7.5 Maßnahmen am Objekt
- 7.6 Entschädigungszahlungen

## **8. Ausblick**

## **9. Quellen**

## 1. Einleitung

Das **Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)** nennt Immissionen, vor denen der Mensch zu schützen ist. Dazu gehören u. a. auch Geräusche und Erschütterungen. Obwohl Erschütterungen im Nahbereich von Eisenbahnstrecken in betroffenen Gebäuden zu erheblichen Belästigungen führen können, sind, im Gegensatz zum Luftschall, bis heute noch keine gesetzlichen Grenzwerte festgelegt worden.

Schäden an der Bausubstanz sind, zumindest nach dem heutigen Wissensstand, bei Entfernungen größer 10m (von der Gleisachse aus gemessen) auszuschließen.

Durch die Neubau- und Ausbaustrecken haben die Probleme mit Erschütterungs-Immissionen verstärkt an Bedeutung gewonnen. Grund dafür sind in eng besiedelten Gebieten die häufig sehr geringen Abstände zwischen Bebauung und Bahnstrecke. Neben den Bahntrassen errichtete Schallschutzwände und passiver Schallschutz lassen, wegen der Abschirmung des Luftschalls, sowohl die Erschütterungen als auch den sekundären Luftschall dominanter erscheinen.

## 2. Begriffe

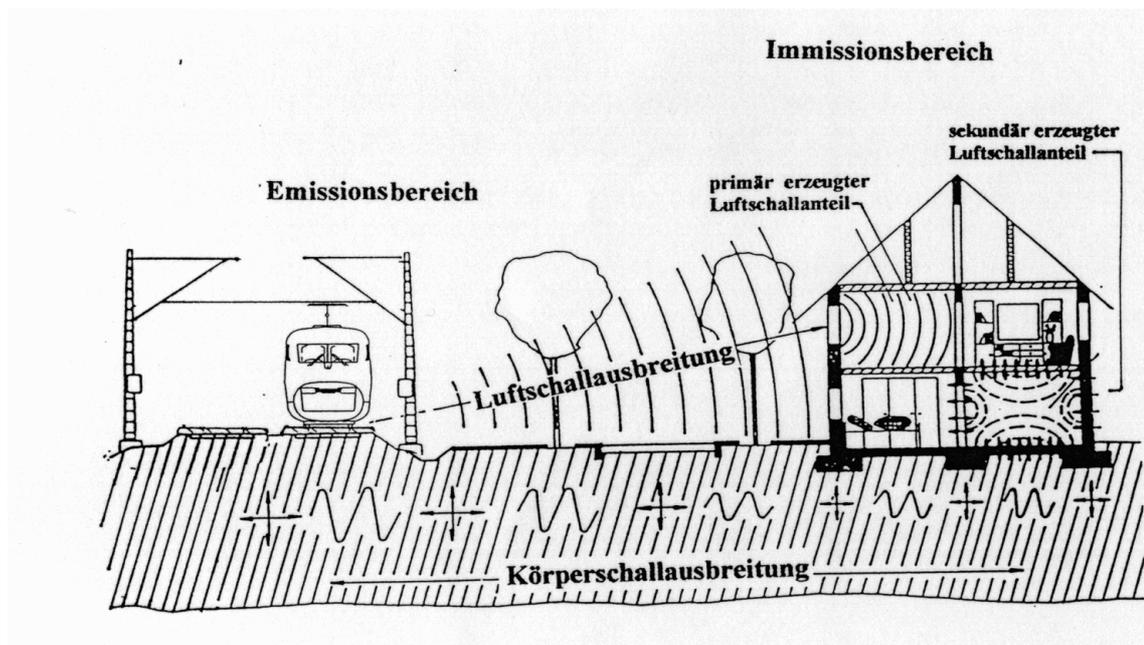
Rauhigkeiten auf der Radlaufläche und auf der Schienenfahrfläche regen beim Rollvorgang im Rad/Schiene- Kontaktpunkt sowohl das Rad als auch die Schiene zu Schwingungen an. Es entsteht Körperschall, der als Luftschall abgestrahlt wird. Man spricht hier vom **primären Luftschall**.

Zusätzlich werden Schwingungen erzeugt, die über das Oberbausystem in den Untergrund eingeleitet werden und sich in Wellenform im umgebenden Boden ausbreiten. Dabei übertragen sich diese Schwingungen auch über die Fundamente auf benachbarte Gebäude, wo sie bei entsprechender Größenordnung z.B. auf dem Fußboden eines Raumes als Erschütterung wahrgenommen werden können (s. Bild 1).

Die in Schwingungen versetzten Gebäudeteile strahlen Schall ab, der als **sekundärer Luftschall** bezeichnet wird.

Außerdem können noch Sekundäreffekte auftreten, wie z.B. Gläserklirren.

Bild 1: Prinzipskizze



Unter **Körperschall** versteht man mechanische Schwingungen, die sich in einem festen Medium oder an dessen Oberfläche ausbreiten (Schall in Festkörpern). Der Körperschall wird im allgemeinen als Körperschallschnelle  $v$  (Schwingschnelle oder Schwinggeschwindigkeit) dargestellt und, ebenso wie der Luftschall, als Pegel  $L_v$  in der Einheit „dB“ angegeben. Es gilt folgende Formel:

$$L_v = 20 \log v/v_0 \text{ (dB)} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

$v$ : Effektivwert der Schwingschnelle (m/s)  
 $v_0$ : Bezugsschnelle ( $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  (m/s))

Von **Erschütterung** spricht man bei tieffrequentem Körperschall, den der Mensch mit seinem ganzen Körper wahrnimmt. Zur Bewertung werden sog. KB-Werte herangezogen.

Die Schwingstärke ist die mit der KB-Filterung bewertete gesamte Körperschallschnelle.

In der DIN 4150, Teil 2, /4/ ist diese spektrale KB - Filterung angegeben (s. Gl. 5).

Der Frequenzbereich der Erschütterungen erstreckt sich bis 80 Hz.

### 3. Messungen und Auswertungen von Körperschall und Erschütterungen

#### 3.1 Meßvorschriften und Grundlagen

Messungen von Schwingungs - Immissionen werden i. Allg. gemäß der DIN 45669, Teil 1 und Teil 2, durchgeführt /1,2/. Dort werden Hinweise zur Wahl der Meßorte und zur Ankopplung der Schwingungsaufnehmer auf dem Meßobjekt gegeben. Ferner werden Grundsätze zur einheitlichen Meßdurchführung beschrieben. Insbesondere werden Hinweise erläutert bezüglich der Ankopplung der Aufnehmer an unterschiedlichen Meßobjekten wie:

- Erdboden
- Hausfundament
- Fußboden eines Raumes

Es muß darauf hingewiesen werden, daß nicht sachgemäße Ankopplungsmethoden zu Meßabweichungen führen, die größer als 10 dB sein können.

Für die speziellen Erschütterungs-Immissionen aus dem Schienenverkehr werden in der DIN 45672, Teil 1, vom September 1991 /3/, Meßverfahren vorgeschrieben. Weitere Auflagen, insbesondere über die Festlegung der Meßorte im Emissions-, Transmissions- und Immissionsbereich sind ebenfalls in dieser DIN genannt. Zusätzlich werden, je nach Streckenführung, detaillierte Angaben über folgende Meßorte gemacht:

- Strecke im Geländeniveau
- Damm, Einschnitt
- Brücke
- Tunnel

Für die freie Strecke ist z.B. der 8m-Meßpunkt (Abstand von der Gleisachse: 8m) festgelegt.

Bei Transmissionsmessungen sollte der Meßabstand zur Gleisachse jeweils verdoppelt werden (also 16m, 32m, 64m und 128m). Dadurch kann die entfernungsbedingte

Pegelabnahme im Erdboden ausreichend ermittelt werden. Zur Ankoppelung von Schwingungsaufnehmern sind geeignete Spieße (ausreichend steif !) in den Erdboden einzupressen. An ihren oberen Enden werden die Aufnehmer befestigt.

Für den Immissionsbereich innerhalb von Gebäuden (Fundament, tragende Teile, Geschoßdecken etc.) wird auf die DIN 45669, Teil 2, verwiesen. Danach sind für Erschütterungsmessungen im Fundamentbereich eines Bauwerkes die Schwingungsaufnehmer am Fundament oder am aufgehenden tragenden Mauerwerk anzubringen. Lockere Treppenstufen, lose Platten oder hohlklingende Aufstellflächen sind als Meßorte ungeeignet.

Erschütterungsmessungen an Geschoßdecken haben jeweils an den Stellen mit den stärksten Schwingungen zu erfolgen. Die größten vertikalen Schwingungsamplituden sind erfahrungsgemäß in Deckenmitte zu erwarten.

Erschütterungsmessungen, die mit Regelzügen durchgeführt werden, sollen den üblichen Betriebszustand erfassen. Auffällige Fehler (z.B. Flachstellen) oder Besonderheiten sowie unterschiedliche Bremsbauarten sind bei der Auswertung gesondert herauszustellen. Da diese Merkmale am besten aus dem zeitlichen Pegelverlauf eines Ereignisses herausgelesen werden können, sollten die Aufzeichnungen der Signale immer mit einer Zwischenspeicherung erfolgen (Magnetband, Videokassette, Plattenspeicher etc.)

### 3.2 Meßgrößen, Meßpunkte und Meßrichtungen bei Beweissicherungsmessungen

Die Erschütterungssignale werden als Körperschallbeschleunigung oder als Körperschallschwinggeschwindigkeit (Körperschallschnelle) mit entsprechenden Aufnehmern gemessen.

Die Meßrichtung im Erdboden und in den Gebäuden ist in der Regel die Hauptrichtungskomponente (Z - Richtung), während am Gebäudefundament die Schwingungssignale in allen drei Richtungen (X-, Y- und Z-Richtung) gemessen werden.

Bei einer Beweissicherungsmessung werden in der Regel pro Gebäude folgende Meßpunkte eingerichtet:

- Mp 1: im Erdboden (**Z-Richtung**)
- Mp 2,3, 4: am Gebäudefundament (Innenwand, gleiszugewandte Seite), ca. 0,6 m über dem Fußboden (**X-, Y- und Z-Richtung**)
- Mp 5: im Erdgeschoß in Raummitte (**Z-Richtung**)
- Mp 6: im oberen Stockwerk in Raummitte (**Z-Richtung**)

Um die Pegelabnahme der Erschütterungssignale in Abhängigkeit von den Bodenverhältnissen zu ermitteln, sind bisweilen weitere Meßpunkte im Außenbereich notwendig.

### 3.3 Auswertungsmethoden

Alle Erschütterungssignale innerhalb eines Gebäudes werden in Körperschall-Schnellepegel und in KB-Werte umgerechnet. Die Auswertungen werden spektral (terzweise) von 1 Hz bis ca. 315 Hz mit der Zeitbewertung *Fast* durchgeführt. Die Berechnung der KB-Werte erfolgt nur bis 80 Hz.

Es werden sowohl der  $L_{eq}$  als auch der  $L_{max}$  (Max-Hold-Methode) ermittelt und dargestellt. Das Spektrum der Max-Hold-Methode ist die einhüllende Kurve des Signals. In jeder Terzmittenfrequenz wird der maximal gemessene Pegel festgehalten. Der Erschütterungs-Emissionspegel (8m Mp) wird nach dieser Auswertungsmethode mit einer Zeitbewertung von 125 ms (*Fast*) ermittelt. Das Ergebnis zeigt eine sehr gute Korrelation zwischen den prognostizierten und den tatsächlich gemessenen Werten von  $KB_{Fmax} / 16$ .

Zur Ermittlung der hausspezifischen Übertragungsfaktoren werden die spektralen Pegeldifferenzen zwischen dem Außenmeßpunkt (vor dem Haus) und den betrachteten Meßpunkten innerhalb des Gebäudes gebildet. Hierfür wird die  $L_{eq}$ -Auswertung eingesetzt. Man versteht darunter einen Mittelungspegel, der über die geometrische Vorbeifahrzeit normiert ist.

Die Ermittlung der KB-Werte (nach der DIN 4150, Teil 2) erfolgt durch die Filterung des Körperschall-Schnellepegels (KB-Filterung). Der  $KB_{Fmax}$  ist der höchste gemessene KB-Wert während einer Vorbeifahrzeit (bis 30 Sekunden).

Die Ermittlung des sekundären Luftschalls wird gemäß der Studie "sekundärer Luftschall aus oberirdischem Schienenverkehr" durchgeführt (veröffentlicht in DAGA 1992, Seite 353 bis 356, /5/). Die Korrelation zwischen dem Körperschall-Schnellepegel (gemessen am Fußboden in Raummitte) und dem sekundären Luftschallpegel wird getrennt nach der Zuggattung (Fernbahn oder S-Bahn) und der Deckenart (Holzbalkendecke oder Betondecke) ermittelt.

#### 4. Berechnungsgrundlagen von Erschütterungsprognosen

Das Ziel einer Erschütterungsprognose ist für die Räume der zu betrachtenden Gebäude

- a) die Ermittlung
  - der KB-Werte
  - der sekundären Luftschallpegel
- b) die Beurteilung nach einschlägigen Richtlinien.

Bei den spektralen (terzweisen) Berechnungen der KB-Werte aus dem Eisenbahnbetrieb ist ein Frequenzbereich von 4 Hz bis 80 Hz ausreichend. Der Frequenzbereich unter 4 Hz ist vernachlässigbar, da der Emissionspegel in diesem Frequenzbereich keine Energie bestimmenden Pegelanteile enthält. Zur Erfassung des sekundären Luftschallpegels sollte sicherheitshalber der auszuwertende Frequenzbereich bis 315 Hz erweitert werden.

Die derzeitigen Vorgehensweisen bei Körperschallprognosen basieren auf meßtechnischen Ergebnissen und theoretischen Überlegungen, wobei das Gesamtsystem in mehrere entkoppelte Teilsysteme unterteilt wird:

- Quelle mit der Ankopplung an den Erdboden
- Ausbreitung der Schwingungen im Erdboden bis vor ein Gebäude
- Übergang der Schwingungen vom Erdboden auf die Fundamente
- Übergang der Schwingungen von den Fundamenten auf die Gebäudestrukturen bzw. Kellerwände.

Die schwingungstechnisch relevanten Kenngrößen solcher Teilbereiche sind, wenn auch noch nicht vollständig, bei der DB AG vorhanden (z.B. in der **Datenbank VIBRA-DB AG** /6/). Nach dem derzeitigen Erfahrungsstand können durch die analytisch-meßtechnischen Prognosen die unsystematischen Fehler zwischen den prognostizierten und den tatsächlich auftretenden Einwirkungen auf Werte kleiner 50% reduziert werden. Die unvermeidbaren unsystematischen Fehler werden im Prognoseverfahren in der Regel durch entsprechende Sicherheitszuschläge berücksichtigt.

Zur Erstellung einer Erschütterungsprognose müssen zunächst die o. g. Ausgangsdaten der entkoppelten Teilsysteme, die bahn-, boden- und gebäudespezifisch sind, ermittelt werden:

- Erschütterungs-Emissionspegel:  $L_E(f)$

- Pegelabnahme im Boden:  $\Delta L_B(f)$
- Übertragungsfaktoren (gebäudespezifisch):  $\Delta L_G(f)$ .

Alle diese Ausgangsgrößen sind spektral zu ermitteln.  
Im allgemeinen werden Prognoseberechnungen für folgende Fälle durchgeführt:

- bestehende Wohngebiete, ohne Vorbelastung
- bestehende Wohngebiete, mit Vorbelastung
- geplante Wohngebiete an bestehenden Bahnanlagen
- geplante Wohngebiete an geplanten Bahnanlagen.

## 4.1 Definitionen der Ausgangsgrößen

### 4.1.1 Erschütterungs-Emissionspegel $L_E(f)$

Als Emissionspegel  $L_E(f)$  versteht man in der Regel den spektralen Körperschall-Schnellepegel im Erdboden (in der Regel am 8m Mp in Z-Richtung gemessen). Der Frequenzbereich sollte sich beim Schienenverkehr bis 315 Hz erstrecken.

Gemäß der zu untersuchenden Zug-/Oberbau-Konstellationen müssen die Erschütterungs-Emissionspegel ermittelt werden.

$$L_E(f) = 20 \lg \frac{v_z(f)}{v_0} \Big|_{8m} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Darin bedeuten:

$v_0$ : Referenzgröße ( $v_0 = 5 \times 10^{-8}$  m/s)  
 $v_z(f)$ : spektrale Körperschallschnelle in mm/s (für ein betrachtetes Zugkollektiv)

Das Emissionsspektrum, oder die Visitenkarte eines Schienenfahrzeugtyps (z.B. ICE-, IC-, Güter- und Nahverkehrszüge) wird an oberirdischen Strecken am 8m Mp und an unterirdischen Strecken an der Tunnelsohle oder an der Tunnelwand ermittelt /8,13/. Die folgenden wichtigen Randbedingungen können die Erschütterungs-Emissionspegel beeinflussen und zu einer Erhöhung der Schwingungen im Erdreich führen:

- Fahrgeschwindigkeit
- Zustand der Radlaufflächen, unrunde Räder
- Störstellen im Gleis, Isolierstöße
- Weichen
- kleine Bogenhalbmesser.

Der Einfluß der Parameter auf die Emissionspegel ist noch nicht genau bekannt und wird zur Zeit untersucht.

### 4.1.2 Pegelabnahme im Erdboden $\Delta L_B(f)$

Die entfernungsbedingte Pegelabnahme der Erschütterungssignale im Erdboden ( $\Delta L_B(f)$ ) wird aus den spektralen Differenzen der Körperschall-Schnellepegel bzw. Beschleunigungspegel zwischen zwei oder mehreren Meßpunkten ermittelt. Diese Meßpunkte müssen in einer Meßachse liegen und verschiedene Abstände von der Anregungsquelle haben.

$$\Delta L_{B_{12}}(f) = 20 \lg \frac{v_1(f)}{v_2(f)} \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

Darin bedeuten:

$v_1(f)$ : Körperschall-Schnelle am Mp 1

$v_2(f)$ : Körperschall-Schnelle am Mp 2

Seitlich von Eisenbahnstrecken nimmt der Körperschall mit zunehmender Entfernung von der Gleisachse ab, wobei, wie auch im Luftschall, die höheren Frequenzen in der Regel stärker abnehmen als die niedrigen /7,8/.

Aus den Messungen an mehreren Meßpunkten wird eine spektrale Regressionskurve der entfernungsbedingten Pegelabnahme ermittelt. Somit kann durch Extrapolation die Pegelabnahme auch für andere Abstände abgeschätzt werden.

Maßgebende Randbedingungen für die Erschütterungsausbreitung sind:

- Bodenart (z.B. Schluff- oder Felsboden)
- Geschichteter Boden
- Grundwasser z.B. in Höhe der Tunnelsohle
- Grundwasser z.B. in Höhe der Fundamente
- Anker, die nach der Fertigstellung der Baues nicht getrennt worden sind
- Ver- und Entsorgungsleitungen mit Hausanschluß.

#### 4.1.3 Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren $\Delta L_G(f)$

Unter gebäudespezifischen Übertragungsfaktoren  $\Delta L_G(f)$  versteht man die spektralen Körperschalldifferenzen zwischen:

- Erdboden und Gebäudefundament
- Erdboden und Innenbereich der Gebäude (Aufenthaltsräume).

Definitionsgemäß lautet:

$$\Delta L_G(f) = 20 \lg \frac{v_{\text{außen}}(f)}{v_{\text{innen}}(f)} \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

Darin bedeuten:

$v_{\text{außen}}(f)$ : Körperschall-Schnelle vor dem Gebäude im Erdboden

$v_{\text{innen}}(f)$ : Körperschall-Schnelle innerhalb des Gebäudes

Bei der Einleitung des Körperschalls vom Untergrund in die Gebäudefundamente erfolgt im allgemeinen eine Reduzierung der Schwingungen. Bei der Weiterleitung vom Fundament über die Wände auf die Stockwerksdecken kommt es wegen ihrer Schwingempfindlichkeit zu einer wesentlichen Verstärkung der Schwingungen, insbesondere im Bereich der Decken-Eigenfrequenzen.

Der größte Risikofaktor bei einer Prognose ist die Körperschallausbreitung im Gebäude, da hier die größten Pegelschwankungen auftreten.

Randbedingungen für die Erschütterungsausbreitung in Gebäuden sind:

- Deckenaufbau des betrachteten Raumes (Holzbalken oder Stahlbeton)
- Stockwerkshöhe (bei Holzbalkendecken).

## 4.2 Berechnungsgrundlagen von Erschütterungs-Immissionen

Zur Berechnung von Erschütterungs-Immissionen innerhalb von Gebäuden müssen die Übertragungsverhältnisse der Erschütterungssignale von der Quelle bis zum Immissionsort spektral verfolgt werden. Zur Berechnung von Erschütterungs-Immissionen werden die Körperschall-Schnellepegel  $L_V$  in dem zu betrachtenden Aufenthaltsraum als Ausgangsgröße für die KB-Werte und für die sekundären Luftschallpegel herangezogen. Die Berechnungen werden spektral von 1 Hz bis 315 Hz durchgeführt. Für die Bestimmung der KB-Werte wird, wie mehrfach erwähnt, der Frequenzbereich bis 80 Hz herangezogen (gemäß DIN 4150, Teil 2).

### 4.2.1 Körperschall-Schnellepegel $L_V$

Die in einem Raum zu ermittelnden Körperschall-Schnellepegel (pro Zuggattung) lassen sich nach folgender Beziehung ermitteln:

$$L_{V\text{-Raum}}(f) = L_E(f) - \Delta L_B(f) - \Delta L_G(f) - \Delta L_M(f) \quad (4)$$

Darin bedeuten:

$L_{V\text{-Raum}}(f)$ :	Körperschall-Schnellepegel (in dB) in dem zu betrachtenden Raum
$L_E(f)$ :	Erschütterungs-Emissionspegel (in dB) der jeweiligen Zuggattung
$\Delta L_B(f)$ :	bodenspezifische Pegelabnahme (in dB) im Erdboden
$\Delta L_G(f)$ :	hauspezifische Übertragungsfaktoren (in dB)
$\Delta L_M(f)$ :	Summe der Einfügungsdämmungen von körperschalldämmenden Maßnahmen im Ausbreitungsweg
f:	Terzmittenfrequenz (in Hz)

### 4.2.2 KB-Werte

Die Berechnung der KB-Werte (pro Zuggattung) erfolgt durch die Frequenzbewertung (Filterung) der Körperschall-Schnelle gemäß Gleichung 1 der DIN 4150, Teil 2.

$$KB(f) = \frac{v_{\text{Raum}}(f)}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}} \quad (5)$$

mit:

$$v_{\text{Raum}}(f) = 10^{\left(\frac{L_{V\text{-Raum}}}{20}\right)} \cdot v_0 \quad (5.1)$$

Darin bedeuten:

$v_{\text{Raum}}(f)$ :	ermittelte Körperschall-Schnelle (in mm/s) in dem zu betrachtenden Raum
$f_0$ :	5,6 Hz (Grenzfrequenz des Hochpaßfilters)
f:	Terzmittenfrequenz (in Hz)
$L_{V\text{-Raum}}(f)$ :	Körperschall-Schnellepegel (in dB) auf dem Fußboden des zu betrachtenden Raumes (nach Gleichung 4)

Die Berechnung muß spektral (terzweise) von 1 Hz bis 80 Hz für jede Zuggattung

durchgeführt werden. Der gesamte KB-Wert pro Zuggattung  $KB_{Zug}$  ergibt sich aus der energetischen Addition der spektralen KB-Werte:

$$KB_{Zug} = \sqrt{\sum_{f=1Hz}^{80Hz} KB^2(f)} \quad (6)$$

Bemerkung:

Bei der Verwendung des Emissionspegels  $L_E(f)$ , der mit der Max-Hold-Methode und mit der Zeitbewertung *Fast* ausgewertet wurde, entspricht der hier berechnete KB-Wert dem maximalen KB-Wert ( $KB_{F-max}$ ) /7/.

Die Beurteilung der Schwingstärke  $KB_{FTTr}$  wird mit dem Taktmaximalverfahren (30 sec) ermittelt. Dabei ist die Streckenbelastung für jede Zuggattung, ohne Zuschläge für Ruhezeiten, getrennt für die Zeiträume Tag bzw. Nacht wie folgt zu berücksichtigen:

Tag:

$$KB_{FTTr-Zug/Tag} = \sqrt{(KB_{Zug})^2 \cdot \frac{N_T \cdot 30}{57600}} \quad (7)$$

Nacht:

$$KB_{FTTr-Zug/Nacht} = \sqrt{(KB_{Zug})^2 \cdot \frac{N_N \cdot 30}{28800}} \quad (8)$$

Darin bedeuten:

$N_T$  : Anzahl der Züge einer betrachteten Zuggattung  
(Zeitraum 6 Uhr bis 22 Uhr)

$N_N$  : Anzahl der Züge einer betrachteten Zuggattung  
(Zeitraum 22 Uhr bis 6 Uhr)

Die gesamte Beurteilungsschwingstärke für den Zeitraum Tag ( $KB_{FTTr-Tag}$ ) bzw. für den Zeitraum Nacht ( $KB_{FTTr-Nacht}$ ) ergibt sich aus der energetischen Addition aller Beurteilungsschwingstärken der einzelnen Zuggattungen für den Zeitraum Tag bzw. Nacht.

Tag:

$$KB_{FTTr-Tag} = \sqrt{\sum_{Zug=1}^{N_{ZT}} (KB_{FTTr-Zug/Tag})^2} \quad (9)$$

Nacht:

$$KB_{\text{FTI-Nacht}} = \sqrt{\sum_{\text{Zug}=1}^{N_{\text{ZN}}} (KB_{\text{FTI-Zug/Nacht}})^2} \quad (10)$$

Darin bedeuten:

- $N_{\text{ZT}}$  : Anzahl der verkehrenden Zuggattungen  
(Zeitraum 6 Uhr bis 22 Uhr)  
 $N_{\text{ZN}}$  : Anzahl der verkehrenden Zuggattungen  
(Zeitraum 22 Uhr bis 6 Uhr)

#### 4.2.3 Sekundärer Luftschallpegel

Der sekundäre Luftschallpegel  $L_{\text{sek-Zug}}$  pro Zuggattung wird gemäß der Studie „Zur Ermittlung des sekundären Luftschalls“ /5/ berechnet. Als Ausgangsgröße gilt der nach Gleichung 4 berechnete Körperschall-Schnellepegel  $L_v$ , der für die Schwingung des Fußbodens des zu betrachtenden Raumes als repräsentativ gilt.

Der für jede Zuggattung ermittelte spektrale Körperschall-Schnellepegel  $L_{v\text{-Raum}}(f)$  wird entsprechend der A-Filterung bewertet  $L_{v(A)\text{-Raum}}(f)$ .

Daraus wird dann der Gesamtpegel durch energetische Addition aller Terzpegel im Frequenzbereich von 20 Hz bis 315 Hz gebildet  $L_{v(A)\text{-Raum/Zug}}$ .

Gemäß der Studie /5/ werden die Berechnungen des sekundären Luftschallpegels wie folgt unterteilt nach:

Zuggruppen:

- Fernbahn
- S-Bahn

Gebäudearten:

- mit Betondeckenaufbau
- mit Holzdeckenaufbau

Es gelten folgende Regressionsbeziehungen:

- **Fernbahn / Betondecke:**

$$L_{\text{sek}} = 26,2 + 0,46 \cdot L_{vA} \quad (11)$$

- **Fernbahn / Holzbalkendecke:**

$$L_{\text{sek}} = 24,5 + 0,59 \cdot L_{vA} \quad (12)$$

- **S-Bahn / Betondecke:**

$$L_{\text{sek}} = 17,6 + 0,62 \cdot L_{vA} \quad (13)$$

- **S-Bahn / Holzbalkendecke:**

$$L_{\text{sek}} = 27,5 + 0,34 \cdot L_{vA} \quad (14)$$

Der so ermittelte sekundäre Luftschallpegel entspricht einem Mittelungsgesamtpegel (in dB (A)),bezogen auf die geometrische Vorbeifahrzeit einer Zugattung.

Aus Bild 2a und 2b kann der sekundäre Luftschallpegel ebenfalls ermittelt werden:

Bild 2a:

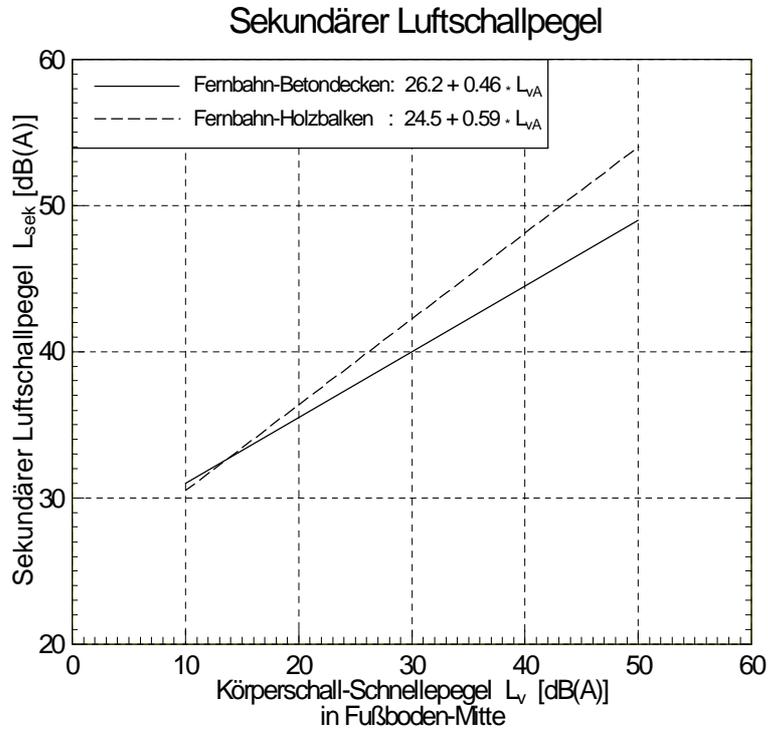
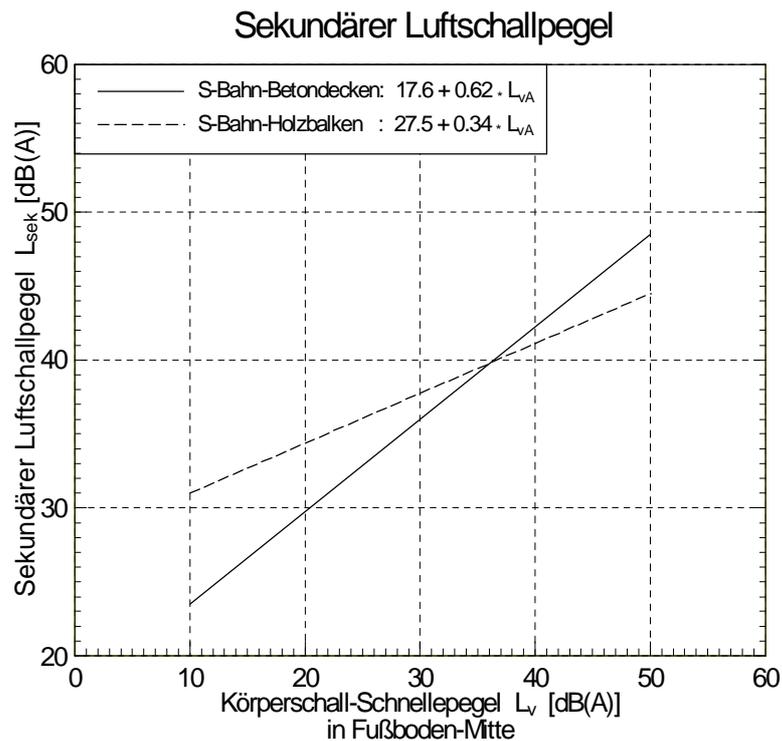


Bild 2b:



Für die Ermittlung der Beurteilungspegel für die Zeiträume Tag/Nacht werden die Streckenbelastungen unter Berücksichtigung der einzelnen Zuggattungen und die dazugehörigen Vorbeifahrzeiten  $t_{\text{zug}}$  angesetzt. Die Berechnungen der Beurteilungspegel pro Zuggattung erfolgen gemäß folgenden Gleichungen:

Tag:

$$L_{A,m\text{-Tag}} = L_{\text{sek}} + 10 \lg \frac{t_{\text{zug}} \cdot N_T}{57600} \quad [\text{dB}] \quad (15)$$

Darin bedeuten:

$N_T$ : Anzahl der Zugereignisse (Zeitraum 6 Uhr bis 22 Uhr)

Nacht:

$$L_{A,m\text{-Nacht}} = L_{\text{sek}} + 10 \lg \frac{t_{\text{zug}} \cdot N_N}{28800} \quad [\text{dB}] \quad (16)$$

Darin bedeuten:

$N_N$ : Anzahl der Zugereignisse (Zeitraum 22 Uhr bis 6 Uhr)

Der gesamte Beurteilungspegel für alle Zuggattungen und für die Zeiträume Tag/Nacht ergibt sich aus der energetischen Addition aller Beurteilungspegel.

Tag:

$$L_{A,m\text{-Tag,ges.}} = 10 \lg \sum_{\text{Zug}=1}^{N_{ZT}} 10^{\frac{L_{m\text{-Tag}}}{10}} \quad [\text{dB}] \quad (17)$$

Nacht:

$$L_{A,m\text{-Nacht,ges.}} = 10 \lg \sum_{\text{Zug}=1}^{N_{ZN}} 10^{\frac{L_{m\text{-Nacht}}}{10}} \quad [\text{dB}] \quad (18)$$

### 4.3 Beschaffung der Ausgangsdaten für die Berechnung

(Welche Ausgangsdaten zu beschaffen sind, hängt von der zu untersuchenden Situation ab. Im folgenden Teil werden die 3 wichtigsten Fälle betrachtet.)

#### 4.3.1 Bestehendes Wohngebiet ohne Vorbelastung

##### 4.3.1.1 Erschütterungs-Emissionspegel $L_E(f)$

Die erforderlichen Erschütterungs-Emissionspegel  $L_E(f)$  werden an Bahnstrecken mit ähnlichem Oberbau/Unterbau und mit den gewünschten Zugparametern (Zuggattung/Zuggeschwindigkeit) meßtechnisch ermittelt. Bei der Übertragbarkeit der Emissionspegel von Ort zu Ort sind unbedingt die bodenspezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen. (Diese Einflußkorrektur wird z. Z. noch genauer untersucht).

Der Erschütterungs-Emissionspegel für den Prognoseort  $L_{EP}(f)$  wird dann je nach Zuggattung und je nach Oberbauverhältnissen wie folgt aus dem Emissionspegel des Vergleichsmeßortes  $L_{EM}(f)$  ermittelt:

$$L_{EP}(f) = L_{EM}(f) + Korr(f) \quad (19)$$

Darin bedeuten:

$L_{EP}$ : Erschütterungs-Emissionspegel für den Prognoseort

$L_{EM}$ : Emissionspegel für den Vergleichsmeßort

Korr: Einflußkorrektur für die bodenspezifischen Eigenschaften

Der Toleranzbereich für die Geschwindigkeit soll nicht mehr als 5 km/Std. betragen.

Die Auswertung des meßtechnisch ermittelten Emissionspegels für den Vergleichsmeßort  $L_{EM}(f)$  erfolgt gemäß der Max-Hold-Methode mit der Zeitbewertung *Fast*.

Bei der  $L_{eq}$ -Auswertung muß das Emissionsspektrum auf die geometrische Vorbeifahrzeit bezogen werden und im Mittel um 8 dB erhöht werden /7/.

#### 4.3.1.2 Entfernungsbedingte Pegelabnahme $\Delta L_B(f)$

a) gemessen:

Um die bodenspezifische Pegelabnahme meßtechnisch zu erfassen, müssen in dem zu untersuchenden Gebiet repräsentative Meßachsen im Nahbereich der Immissionsorte (Gebäude) ausgesucht werden. Die Körperschallanregung kann durch einen Flächenrüttler oder eine Vibrationswalze erfolgen. Diese Anregung kann als stationäre Anregung betrachtet werden, wie dies vergleichbar auch beim Schienenverkehr der Fall ist. In einer Meßachse sollen verschiedene Meßpunkte in unterschiedlichen Abständen von den Anregungsquellen errichtet werden (z.B. 8m, 16m, 32m und 64 m).

Über Regressionsanalysen sind die entfernungsbedingten Pegelabnahmen spektral (terzweise) und in Abhängigkeit von der Entfernung zu bestimmen. Die Körperschall-signale sollen gemäß  $L_{eq}$ -Methode ausgewertet werden. Aus mehreren Meßversuchen wird dann ein arithmetischer Mittelwert gebildet.

Wegen der unterschiedlichen Anregungsarten zwischen Punktanregung und Linienanregung begrenzter Länge sind im Abstandsbereich bis  $r < l^2 / \lambda_R$  die arithmetischen Mittelwerte mit folgendem geschätzten Pegelzuschlag ( $Korr_{Boden}$ ) zu korrigieren:

$$Korr_{Boden} = -10 \lg \left( \frac{r}{r_0} \right) \quad [dB] \quad (20)$$

Darin bedeuten:

r: Abstand zwischen Immissionsort und Gleis

$r_0$ : Referenzabstand (8m)

l: Zuglänge (in m)

$\lambda_R$ : Wellenlänge der Rayleighwelle

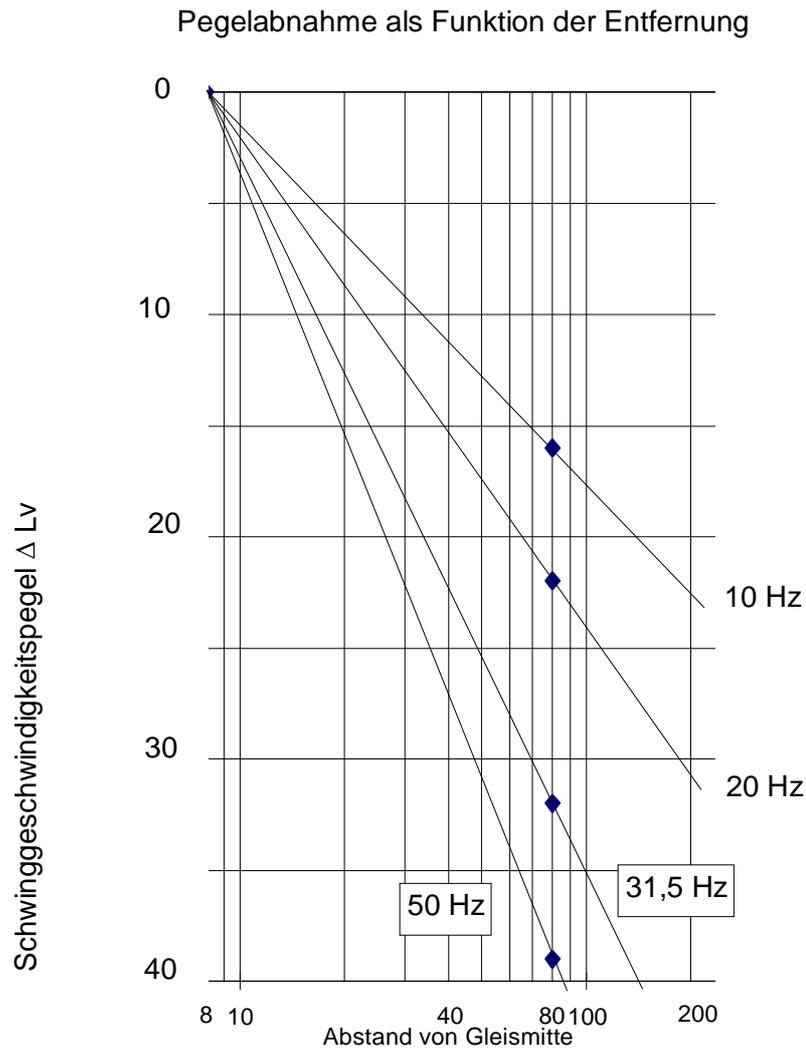
Die genaue Ermittlung dieses Korrekturfaktors ist zur Zeit in Bearbeitung.

b) aus der Literatur (statistisch):

Wenn wegen der örtlichen Gegebenheiten in bestimmten Fällen die Durchführung der oben beschriebenen Messungen nicht möglich ist, müssen die entfernungsbedingten Pegelabnahmen im Erdboden der Literatur /8/ entnommen werden.

Die in der Abb. 3 gezeigten spektralen Beziehungen können zur Abschätzung der entfernungsbedingten Pegelabnahmen herangezogen werden. Die Regressionskurven sind allerdings mit Unsicherheiten verbunden, da die ortsspezifischen Bodeneigenschaften des zu untersuchenden Ortes nicht direkt berücksichtigt werden können.

Bild 3:



#### 4.3.1.3 Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren

##### a) von ausgesuchten Objekten:

Von exponierten Gebäuden (geringer Abstand, Vorschädigung der Bausubstanz, erschütterungsempfindliche Konstruktion) müssen die Übertragungsfaktoren vor Ort in folgender Weise meßtechnisch erfaßt werden:

- vom Außenmeßpunkt zum Meßpunkt an der Kellerwand (0,6 m über dem Boden, auf der gleiszugewandten Seite) in **Z-Richtung**
- vom Außenmeßpunkt zum Meßpunkt im Erdgeschoß des Gebäudes (Wohnraum, Raummitte) in **Z-Richtung**
- vom Außenmeßpunkt zum Obergeschoß des Gebäudes (Wohnraum, Raummitte) in **Z-Richtung**

Um ausreichende Nutzsignale zu erhalten, soll die Fremdanregung mit einer Vibrationswalze erfolgen ( $m > 2500$  kg). Der Abstand zum Gebäude muß in etwa dem Abstand zwischen dem geplanten Gleis und dem zu betrachtenden Gebäude entsprechen, auf jeden Fall soll er jedoch mindestens die doppelte Hausbreite betragen. Die Ergebnisse der Studie /9/ (noch nicht veröffentlicht) zeigen, daß die durch eine Fremdanregung ermittelten Übertragungsfaktoren eines Gebäudes in der Regel größer sind, als die durch die Bahnanregung ermittelten Werte. Das führt zu einer Prognosesicherheit zugunsten der betroffenen Anwohner.

Die Fremdanregungen sollen möglichst an verschiedenen Stellen mit unterschiedlichen Abständen und Betrachtungswinkeln erfolgen. Aus den einzelnen Übertragungsspektren, ist der arithmetische Mittelwert zu bilden.

Die Übertragungsfaktoren sollen nach der  $L_{eq}$ -Methode ausgewertet werden.

##### b) von anderen Objekten, ohne Messungen:

Um den Meßaufwand zu minimieren können nicht alle betroffenen Gebäude, die in dem abgeschätzten Einwirkungsbereich liegen, gemessen werden. Deshalb können für alle Objekte, die mit den gemessenen Gebäuden vergleichbar sind, für die hausspezifischen Übertragungsfaktoren die gleichen Annahmen getroffen werden.

Vergleichbare Objekte bedeutet:

- gleicher Aufbau, gleiches Baujahr und gleicher Bauzustand
- Wohnungen in einem Häuserblock und im gleichen Stockwerk

Für Objekte, die mit den gemessenen Objekten schwer vergleichbar sind, kann die statistische Methode /10/ angewandt werden. In diesem Fall muß allerdings die Deckenresonanzfrequenz so variiert werden, daß die zu erwartenden Erschütterungs-Immissionen den maximalen Wert erreichen. Das bedeutet, daß der kritischste Fall zugrunde gelegt werden muß.

Die hier zu untersuchenden Deckenresonanzfrequenzen sollen, wie bei den meisten Wohngebäuden, in einem Frequenzbereich von 16 Hz bis 50 Hz liegen.

Die Berechnungen erfolgen terzweise.

In den Bildern 4a und 4b sind die statistisch ermittelten hausspezifischen Übertragungsfaktoren für Betondecken(4a) und Holzbalkendecken(4b) bei unterschiedlichen Stockwerkshöhen angegeben. Die spektralen Übertragungsfaktoren sind auf die Resonanzfrequenz des Fußbodens normiert.

## 4.3.2 Bestehende Wohngebiete mit Vorbelastung

### 4.3.2.1 Erschütterungs-Emissionspegel $L_E(f)$

Messungen sind überall dort zu empfehlen, wo die gesuchte Konstellation (Zuggattung, Zuggeschwindigkeit und Oberbauart) vor Ort meßbar ist. Die Auswertungen erfolgen gemäß der Max-Hold-Methode (mit der Zeitbewertung *Fast*). In den übrigen Fällen werden die Emissionspegel der gesuchten Konstellationen so ermittelt, wie es in Punkt 4.3.1.1 beschrieben ist.

### 4.3.2.2 Entfernungsbedingte Pegelabnahme $\Delta L_B(f)$

Bei vorhandenen Eisenbahnstrecken kann die Anregung durch Zugvorbeifahrten erfolgen. In bestimmten Abständen vom Bahngleis (z.B. 8m, 16m und 32m) sind mehrere Meßpunkte innerhalb einer Meßachse zu errichten, wobei diese im Nahbereich der zu untersuchenden Gebäude gewählt werden sollen.

Die Pegelabnahme soll spektral in Abhängigkeit von der Entfernung ausgewertet werden, wobei die  $L_{eq}$ -Methode anzuwenden ist. Die daraus resultierende spektrale Mittelwert-Regressionskurve wird bei der Berechnung angesetzt.

### 4.3.2.3 Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren $\Delta L_G(f)$

Die Anregung erfolgt durch Zugvorbeifahrten auf der bestehenden Eisenbahnstrecke. Die Ermittlungen der gebäudespezifischen Übertragungsfaktoren werden gemäß Pkt. 4.3.1.3 durchgeführt und ausgewertet.

## 4.3.3 Geplante Bebauung an bestehenden Bahnstrecken

Dieser Fall spielt für die Bauleitplanung eine besondere Rolle. Dabei soll der Mindestabstand der Bebauung zum Bahngleis ermittelt werden, ab dem die Anhaltswerte der DIN 4150, Teil 2, eingehalten werden.

### 4.3.3.1 Erschütterungs-Emissionspegel $L_E(f)$

Um die tatsächlichen Erschütterungsamplituden vor den geplanten Gebäuden zu ermitteln, soll in diesem Fall der Erschütterungs-Emissionspegel  $L_E(f)$  nicht am 8m-Mp sondern vor den geplanten Wohngebäuden (Fassade) gemessen werden. Die Emissionspegel werden für jede Zuggattung zusammengestellt, für die dann ein repräsentativer Mittelwert (energetisch gemittelt) gebildet wird. Die Auswertung wird nach der Max-Hold-Methode mit der Zeitbewertung *Fast* durchgeführt. Der Frequenzbereich soll sich spektral (terzweise) von 1 Hz bis 315 Hz erstrecken.

### 4.3.3.2 Entfernungsbedingte Pegelabnahme $\Delta L_B(f)$

Die spektrale Pegelabnahme im Erdboden soll innerhalb des geplanten Bebauungsgebiets in mind. 3 Meßachsen (möglichst gleichmäßig verteilt) ermittelt werden. Die Anregung erfolgt durch Zugvorbeifahrten. Die Auswertungen sollen gemäß 4.3.2.2 erfolgen.

### 4.3.3.3 Gebäudespezifische Übertragungsfaktoren $\Delta L_G(f)$

Für die Planungsphase werden die Übertragungsfaktoren der statistischen Ergebnisse der Studie /10/ (gemäß Bild 4a und 4b) entnommen. Die Berechnungen der Erschütterungs-Immissionen müssen auch für die ungünstigsten Fälle durchgeführt

werden.

Hierfür muß die Lage der Deckenresonanzfrequenz in einem Bereich von 16 Hz bis 50 Hz terzweise variiert werden, um den maximalen Immissionswert zu erhalten. Für die Beurteilung und Ermittlung des kritischen Einwirkungsbereiches gelten die berechneten maximalen Immissionswerte. Der kritische Einwirkungsbereich endet ab dem Abstand, bei dem die Anhaltswerte der DIN 4150, Teil 2, gerade noch eingehalten werden.

Bild 4a:

Gebäude mit Betondeckenaufbau  
(Mittelwert mit Standardabweichungen)

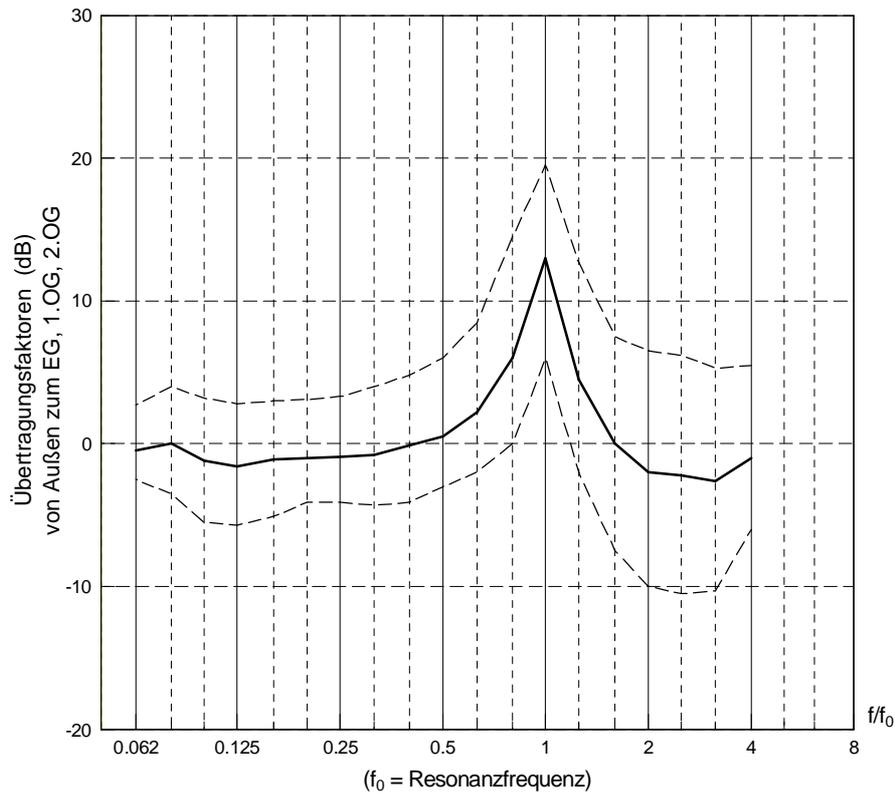
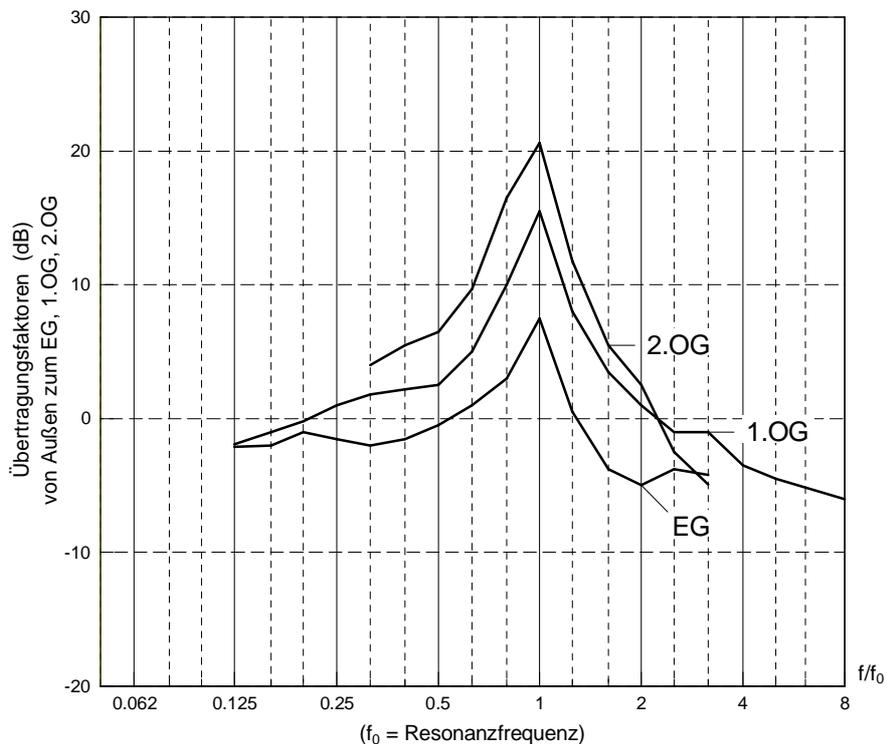


Bild 4b:

Gebäude mit Holzbalkendeckenaufbau  
(Mittelwert der Stockwerke)



## 5. Praktische Hinweise und Beispiele zur Erstellung von Erschütterungsprognosen

### 5.1 Erfassung der Istsituation und der Prognosesituation:

Als sinnvoll erweist sich zu Anfang eine sorgfältige Bestandsaufnahme und die Erfassung der zukünftigen Situation.

Besonders schwierig erweisen sich die Beschwerdefälle, bei denen durch die DB AG erhebliche bauliche Eingriffe an den Bahnanlagen vorgenommen worden sind, ohne den Ausgangszustand durch entsprechende Beweissicherungsmaßnahmen vollständig oder auch nur teilweise erfaßt zu haben.

Das kann dazu führen, daß die DB AG, die in der Beweispflicht steht, nachträglich teure Schutzmaßnahmen einbauen oder die Beschwerdeführer durch entsprechende Entschädigungsmaßnahmen zufrieden stellen muß. In diesem Fall ist die Bestandsaufnahme wie bei der Planung von Schienenwegen (mit erheblichen baulichen Eingriffen) durchzuführen.

#### **Auflistung der wesentlichen Parameter:**

##### a) Erfassung des Istzustandes

Bei der Planung von Schienenwegen (ABS/NBS-Maßnahmen, S-Bahn-Neu- und -Ausbau) sind folgende Fragen zu beachten:

- Welche Zugarten verkehren z. Z. auf der bestehenden Trasse?
- Welche Geschwindigkeiten werden z. Z. gefahren?
- Welche Oberbauart ist vorhanden?
- Sind im Oberbau Störstellen vorhanden?
- Wie ist die Trassenlage?
- Wie sind die Untergrundverhältnisse?
- Wie groß ist der Abstand zur betroffenen Bebauung?
- Gibt es im Ausbreitungsweg Maßnahmen die die Erschütterungsausbreitung begünstigen?
- Wie ist die Bauart der betroffenen Bebauung?
- Wie ist der Unterhaltungszustand der betroffenen Bebauung?
- Wie ist die Nutzung der betroffenen Bebauung?
- Sind Besonderheiten vorhanden?

##### b) Erfassung des Prognosezustandes

- Welche Zugarten verkehren zukünftig auf der neuen Trasse?
- Welche Zugarten verkehren zukünftig auf der alten Trasse?
- Welche Geschwindigkeiten werden dann auf der neuen und der alten Trasse gefahren?
- Welche Oberbauart wird auf der neuen Trasse eingebaut?
- Wird der Oberbau der alten Trasse ebenfalls erneuert?
- Welche Oberbauart wird bei einer Erneuerung eingebaut?
- Erfolgt nur eine Durcharbeitung des vorhandenen Oberbaus (mit oder ohne PSS)?
- Wie sind die Untergrundverhältnisse im Bereich der Trasse?
- Wird bei der neuen Trasse ein Bodenaustausch vorgenommen?
- Sind im Oberbau der zukünftigen Trasse Störstellen vorhanden (Weichen, Isolierstöße)?
- Wie ist die Trassenlage (Einschnitt, Damm, Trog, Tunnel usw.)?
- Wie sind die Untergrundverhältnisse im Ausbreitungsweg?
- Wie groß ist der zukünftige Abstand zur betroffenen Bebauung?

- Gibt es im Ausbreitungsweg Maßnahmen die die Erschütterungsausbreitung begünstigen?
- Wie ist die Bauart der betroffenen Bebauung?
- Wie ist der Unterhaltungszustand der betroffenen Bebauung?
- Wie ist die Nutzung der betroffenen Bebauung?
- Sind Besonderheiten vorhanden?

Nach erfolgter Bestandsaufnahme ist zu prüfen, welche der vorgenannten Einflußgrößen im Rahmen einer Beweissicherungsmessung meßtechnisch erfaßt werden können.

## 5.2.Beispiele

Anhand von konkreten Beispielen wird die Erschütterungsproblematik erläutert:

### Beispiel 1: Die einfache Beweissicherungsmessung

Auf beiden Seiten einer **bestehenden** Strecke befindet sich eine Wohnbebauung. Die Bebauung rechts der Strecke ist durch einen Entwässerungsgraben und eine Straße von der Strecke getrennt. Zwischen der Bebauung auf der linken Seite und der Strecke ist freies Gelände; Strecke und Wohnbebauungen sind höhengleich. Der Oberbau und das Erdplanum der vorhandenen Strecke werden erneuert. Die Geschwindigkeit der Züge bleibt unverändert. Obwohl erfahrungsgemäß durch die vorgenannten Maßnahmen die Erschütterungs-Immissionen nicht erhöht werden, sind, um Einwendungen und Forderungen der betroffenen Anwohner wegen angeblich erhöhter Erschütterungs-Immissionen nach dem Umbau der Strecke überprüfen und abwehren zu können, einfache Beweissicherungsmessungen in den repräsentativen Wohnhäusern durchzuführen. Diese Messungen sollten vor Beginn jeglicher Baumaßnahmen erfolgen.

Bild 5 zeigt die übliche Anordnung der Meßpunkte in einem Wohnhaus.

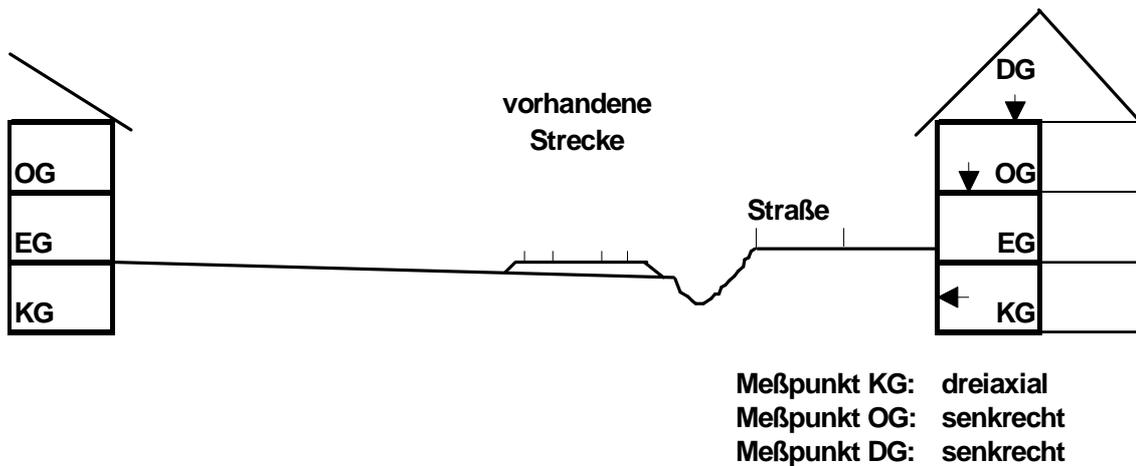
Der Meßpunkt im Kellergeschoß dient zur Beurteilung der Erschütterungseinwirkung auf das Gebäude (nach der DIN 4150 Teil 3. „Gebäudeschäden“) bzw. zum Vergleich mit dem Zustand nach Durchführung der baulichen Maßnahme. Er sollte an der der Strecke zugewandten Kellerwand in ca. 0,6 m Höhe angebracht werden, wobei ein Dreiaxialaufnehmer einzusetzen ist, der die Erschütterungen in X-, Y- und Z-Richtung erfaßt.

Die Meßaufnehmer im 1.OG und im obersten bewohnten Geschoß (z.B. Dachgeschoß) erfassen nur die Schwingungen in vertikaler Richtung (Z-Richtung). Diese Schwingungen weisen üblicherweise die höchsten Amplituden auf. Wenn der Bewohner der Meinung ist, daß die Erschütterungen in seinem Schlafzimmer im Erdgeschoß am stärksten sind, kann auf seinen Wunsch von der genannten Meßanordnung abgewichen werden.

Bei einer eventuellen Wiederholungsmessung, z.B. nach Beendigung der Baumaßnahme, sind die Meßpunkte an den exakt gleichen Stellen anzubringen, um einen einwandfreien Vergleich der Meßwerte zu gewährleisten. Der Meßpunkt am Gebäudefundament eignet sich dazu am besten. Eine Prognoseberechnung ist in diesem Fall nicht erforderlich.

Bild 5:

### Einfache Beweissicherungsmessung

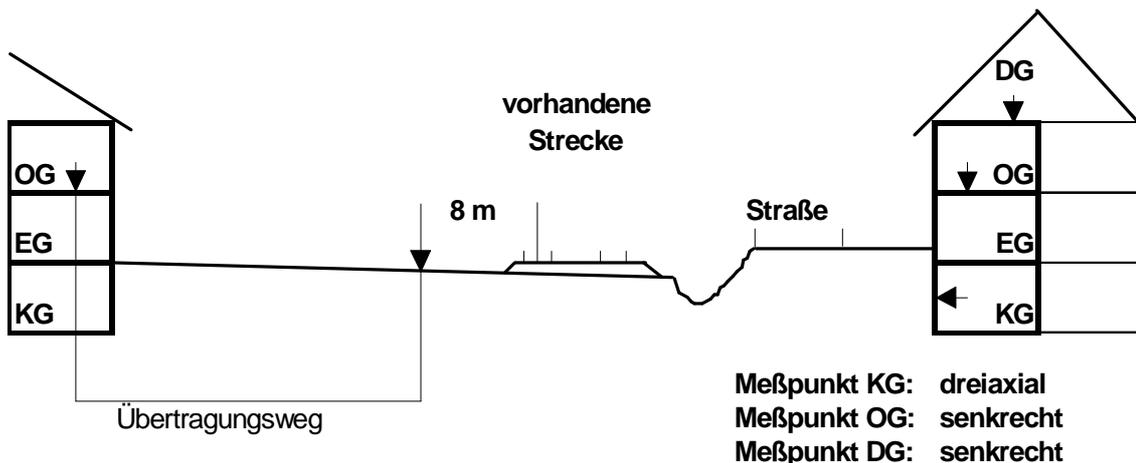


### Beispiel 2: Beweissicherungsmessung mit Prognosemeßpunkt

Werden durch den Umbau einer Strecke (z.B. Einbau eines schwereren Oberbaus, Verschiebung der Gleislage, Erweiterung der befahrenen Gleise, Erhöhung der Streckengeschwindigkeit und der Belastung) höhere Erschütterungs-Immissionen erwartet, muß eine Prognose erstellt werden. Zum besseren Vergleich zwischen den Emissionspegeln im Ist- und Prognosezustand ist ein Prognosemeßpunkt 8m seitlich von der Gleismitte des nächst gelegenen Gleises oder vor dem zu untersuchenden Gebäude einzurichten.

Bild 6:

### Beweissicherungsmessung mit Prognosemeßpunkt



Der Prognosemeßpunkt bietet in diesem Beispiel die Möglichkeit, mehrere Parameter meßtechnisch zu erfassen und zu untersuchen. Dadurch ist es möglich,

1. die derzeitigen von der Strecke ausgehenden Erschütterungen zu beurteilen. (Die Terzfrequenzspektren mehrerer Zugvorbeifahrten lassen an diesem Meßpunkt möglicherweise auf einen schlechten Unterhaltungszustand des Ober-

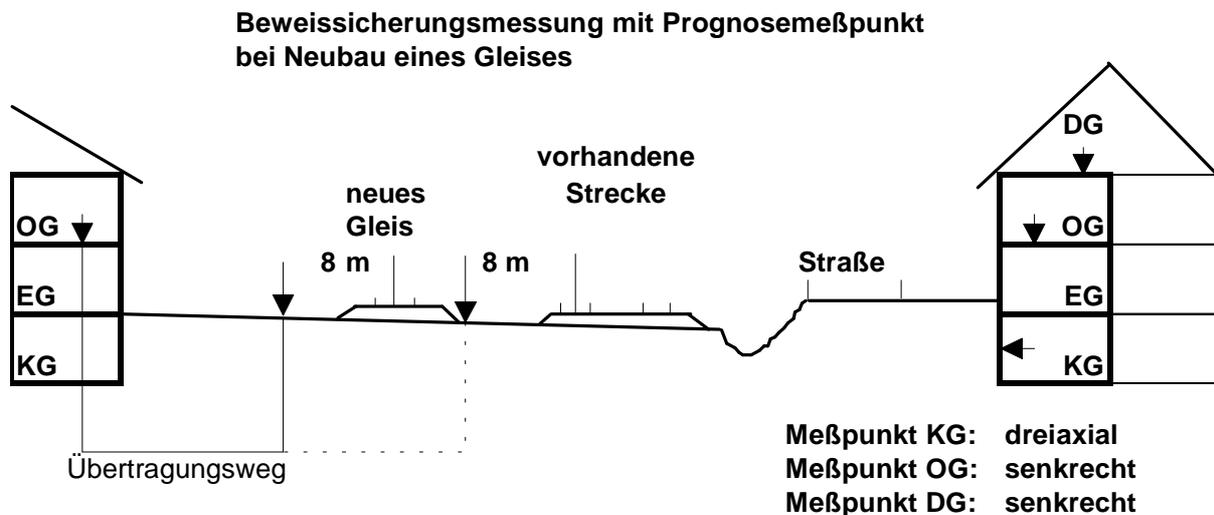
- baus, auf eine veraltete Oberbautechnik oder auf schlechte Untergrundverhältnisse schließen.)
2. die Übertragungsfunktion durch Differenzbildung zwischen einem beliebigen Meßpunkt im Gebäude und dem Prognosemeßpunkt zu ermitteln. (Sie wird ebenfalls spektral dargestellt und kann zum Vergleich herangezogen werden).
  3. bei unverändertem Übertragungsweg mit Hilfe der Übertragungsfunktion und eines neuen Ausgangsspektrums eine Erschütterungsprognose zu erstellen. In dem Prognoseausgangsspektrum müssen alle Parameter der zukünftigen Strecke enthalten sein, d.h., daß z.B. höhere Zuggeschwindigkeiten oder neue Zuggattungen zu berücksichtigen sind.

Durch den Vergleich des Immissionspegels (aus der Beweissicherungsmessung) mit dem Wert der Prognoseberechnung kann ermittelt werden, wie sich nach dem Umbau der Strecke und nach der Erhöhung der Streckengeschwindigkeit die Erschütterungs-Immissionen verändern.

Bei Verschiebung der vorhandenen Strecke oder bei Hinzubau eines oder mehrerer Gleise muß der Prognosemeßpunkt 8m seitlich der Gleismitte des zukünftig nächstgelegenen Gleises liegen (s. Bild 7).

Zur Überprüfung der vom alten Gleis ausgehenden Erschütterungen kann, wenn erforderlich, ein weiterer 8m-Meßpunkt seitlich des alten Gleises vorgesehen werden. Dies kann z.B. dann der Fall sein, wenn das alte Gleis ebenfalls umgebaut wird und wenn anschließend auf diesem Gleis schneller gefahren wird.

Bild 7:



### Beispiel 3: Erschütterungsprognosen bei Neubaustrecken (ohne Vorbelastung)

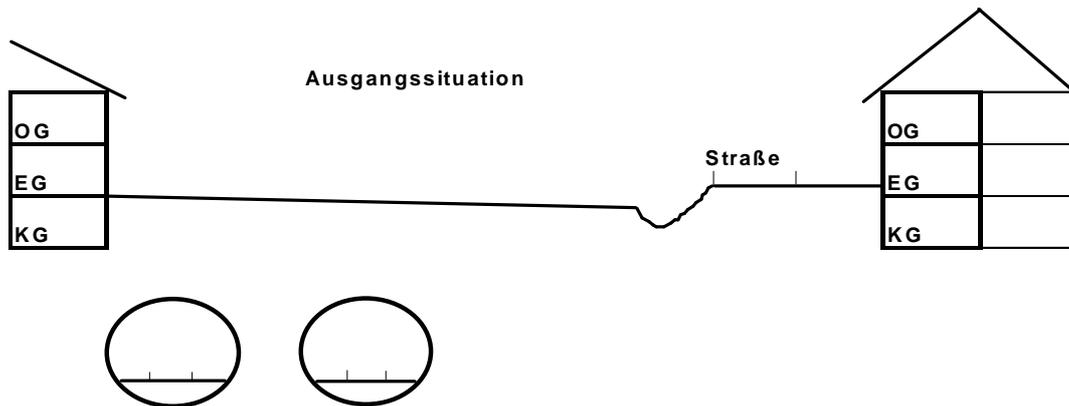
In allen vorangegangenen Beispielen wurde davon ausgegangen, daß zu einer bestehenden Strecke Gleise hinzugebaut werden, oder die bestehende Strecke verändert wird. So konnten z.B. die Übertragungswege meßtechnisch erfaßt und die entsprechenden Einflußparameter rechnerisch ermittelt werden, da als Anregungsquelle Zugvorbeifahrten herangezogen werden konnten.

Bei NBS-Strecken fehlt, wegen der noch nicht bestehenden Strecke, die Anregungsquelle „Zugvorbeifahrten“. In diesem Fall muß versucht werden, durch eine Ersatzanregung möglichst viele der für die Prognose erforderlichen Parameter meßtechnisch zu erfassen.

Am einfachsten ist die Bestimmung der Deckenresonanzen der betroffenen Wohnhäuser. Übertragungswege und spektrale Übertragungsfunktionen vom Fundament eines Wohnhauses zum Immissionsort im OG lassen sich durch punktförmige Anregungen, z.B. durch Flächenrüttler oder Vibrationswalzen, annähernd gut bestimmen. Dies gilt auch, mit entsprechenden Korrekturen, für die Ermittlung der Übertragungswege im Erdboden.

Besonders schwierig werden Prognoseberechnungen, wenn es zu Veränderungen im Übertragungsweg kommt und/oder die Ausgangsparameter nicht vorhanden sind.

Bild 8:



Im vorliegenden Beispiel ist für eine in zwei eingleisigen Tunnelröhren verlaufende NBS-Strecke (Feste Fahrbahn, Streckengeschwindigkeit 300 km/h) eine Erschütterungsprognose zu erstellen. Da in diesem Zusammenhang auch die Notwendigkeit von Schutzmaßnahmen untersucht werden muß, beeinflusst das Prognoseergebnis in direkter Weise die technische Ausführung der Baumaßnahme. Sollte es sich z.B. zeigen, daß ein Masse-Feder-System erforderlich wird, hat dies wegen seiner entsprechenden Bauhöhe Einfluß auf den Tunnelquerschnitt und damit auf die Kosten.

Die Berechnungsmethode für die Erschütterungsprognose ist in Kapitel 4 ausführlich dargestellt. Bei der Bahn AG wurde ein Rechenprogramm entwickelt, das alle o. g. Rechenvorschriften berücksichtigt /11/.

Die Genauigkeit eines Rechenprogrammes hängt sehr von der Auswahl der Ausgangsgrößen und deren Ermittlungsmethode ab.

Einige Institute haben in der Vergangenheit versucht, Erschütterungsprognosen mit Hilfe mathematischer und physikalischer Berechnungsmodelle durchzuführen (z.B. mit Finiten Elementen). Diese Methoden führen u. E., im Gegensatz zu den von vielen Ingenieurbüros angewandten statistischen Berechnungsmethoden, zu keinen gesicherten Ergebnissen.

Dabei darf nicht unerwähnt bleiben, daß bei der Prognose bzw. bei der Berechnung von Erschütterungen niemals die Genauigkeit erreicht werden kann, wie sie im Bereich des Luftschalls vorhanden ist. Der Grund liegt in dem zu geringen Wissen über die Ausbreitungsparameter im Erdboden und im zu betrachtenden Gebäude.

## 5.3 Auflagen für eine erschütterungstechnische Gesamtuntersuchung

### 5.3.1 Vorbemerkung

Für den Ausbau/Neubau eines Streckenabschnittes sollen aussagefähige Planfeststellungsunterlagen erarbeitet werden. Ein Bestandteil dieser Unterlagen sind Ergebnisse aus erschütterungstechnischen Untersuchungen, die eine Aussage zulassen, ob die Erschütterungseinwirkungen auf die Anwohner und auf die Gebäude auf ein Minimum beschränkt bleiben (nach dem heutigen Stand der Technik). Es soll die Aussage gemacht werden, daß es, verglichen mit der bisherigen Situation, durch die baulichen Änderungen und deren Folgemaßnahmen für die Anwohner zu keinen stärkeren Erschütterungs-Immissionen kommt.

Während für die bestehenden Bahnstrecken zuerst die Vorbelastung durch Erschütterungen aus dem Eisenbahnverkehr zu ermitteln ist, muß für den Zustand nach Abschluß der Baumaßnahmen eine Prognose erstellt werden. Prinzipiell handelt es sich also um zwei Aufgabenstellungen.

### 5.3.2 Meßtechnische Erfassung des Istzustandes im Rahmen einer Beweissicherung

#### 5.3.2.1 Anzuwendende Richtlinien

/1/ DIN 45669-1: Messung von Schwingungsimmissionen  
Teil 1: Schwingungsmesser; Anforderungen, Prüfung. - Juni 1995 -

/2/ DIN 45669-2: Messung von Schwingungsimmissionen  
Teil 2: Meßverfahren, - Juni 1995 -

/3/ DIN 45672-1: Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenwegen  
Teil 1: Meßverfahren. - September 1991 -

/4/ DIN 45672-2: Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenwegen  
Teil 2: Auswerteverfahren, - Juli 1995 -

Im Kapitel 3.1 wurden diese Richtlinien kurz erläutert.

#### 5.3.2.2 Allgemeingültige Forderungen zum Meßumfang

Eine Auswahl der zu behandelnden Meßobjekte hat im Rahmen einer Ortsbesichtigung durch den Auftraggeber und den Gutachter, unter Beteiligung von FTZ 81, zu erfolgen.

Für jeden ausgewählten Meßquerschnitt (Gebäude) sind insgesamt 6 Meßpunkte **raummittig** innerhalb des jeweiligen Gebäudes und 1 bis 2 Meßpunkte im Ausbreitungsweg wie folgt anzuordnen.

- 3 Mp im Keller/Fundamentbereich (**X-, Y-, Z-Richtung**)
- 1 Mp im Erdgeschoß eines bahnseitig gelegenen Raumes (**Z-Richtung**)
- 1 Mp im 1.OG eines bahnseitig gelegenen Raumes (**Z-Richtung**)
- 1 Mp im obersten Vollgeschoß eines bahnseitig gelegenen Raumes (**Z-Richtung**)
- 1-2 Meßpunkte im Ausbreitungsweg (**Z-Richtung**)

Als Anregung dienen Fahrten aus dem Regelzugverkehr. Um repräsentative Aussagen treffen zu können, sollten mindestens 5 bis 10 Ereignisse der selben Zuggattung meßtechnisch erfaßt werden. Der Meßzeitraum richtet sich vorrangig nach der Anzahl der Zugfahrten, die zur Ermittlung einer statistisch gesicherten Übertragungsfunktion erforderlich sind.

Zusätzlich müssen folgende Angaben erfaßt werden:

- Zuggeschwindigkeit
- Zuggattung (ICE, IC/IR, RE/SE, GZ)
- Zuglänge
- befahrenes Gleis und Fahrtrichtung
- Meßzeitpunkt
- Oberbauzustand (evtl. exakte Beschreibung des Schienenzustandes)
- meteorologische Daten (nur bei Bodenfrost)

Die Zeitsignale der erfaßten Meßgrößen aller Zugfahrten sind für mögliche spätere Auswertungen und Frequenzanalysen auf geeigneten Speichermedien aufzuzeichnen.

Für den Einsatz der Meßgeräte und für die Durchführung der Messungen sind die entsprechenden Anforderungen der in Pkt. 5.2.2.1 genannten DIN in ihrer jeweiligen aktuellen Fassung zu beachten.

### 5.3.2.3 Auswertung und Darstellung der Meßgrößen

Folgende Meßgrößen sind darzustellen:

- a) Der aufgetretene Maximalwert der bewerteten Schwingstärke  $KB_{F_{max}}$  nach DIN 4150, Teil 2 in tabellarischer Form für alle erfaßten Meßzugfahrten und Meßpunkte.
- b) Bildung von Terzspektren für den Frequenzbereich von 4 Hz bis 315 Hz für alle erfaßten Meßkanäle und alle Zugfahrten in Form von Max-Hold-Spektren. Die jeweiligen Terzspektren eines Meßpunktes (getrennt nach Zuggattungen) sind mit der Zeitbewertung Fast energetisch zu mitteln. Die Spektren sind als Körperschall-Schnellepegel terzweise für den energetischen Mittelwert mit oberem und unterem Streubereich in dB re  $5 \cdot 10^{-8}$  m/s darzustellen.  
Dabei sind folgende Maßstäbe zu verwenden:  
Abszisse: 15 mm pro Oktave  
Ordinate: 20 mm pro 10 dB.
- c) Bildung von Terzpegeldifferenzen der gemittelten Terzschnellepegelspektren zwischen den Ausbreitungsmeßpunkten und allen Meßpunkten des jeweils untersuchten Gebäudes (Übertragungsfaktoren).

### 5.3.2.4 Meßbericht

Über die durchgeführte Untersuchung ist ein Meßbericht zu erstellen. Er muß neben den geforderten Auswertergebnissen auch eine exakte Beschreibung der eingesetzten Meßtechnik, des Meßortes und eine bemaßte Skizze der untersuchten Meßräume mit den Aufstellungsorten der Meßaufnehmer beinhalten. Der Meßbericht sollte eine Zusammenfassung der Ergebnisse in komprimierter Form sein.

Wegen einer möglichen Nachmessung, die als Option zusätzlich vergeben werden kann, sind Mieter und Eigentümer der Gebäude mit Anschrift und Rufnummer zu erfassen. Diese Aufstellung ist dem Bericht formlos beizufügen.

### 5.3.3 Auflagen zur Erstellung einer Erschütterungsprognose

#### 5.3.3.1 Grundlagen der weiterführenden Untersuchungen

Die erschütterungstechnischen Untersuchungen gehen prinzipiell von folgenden Arbeitsunterlagen aus:

- a) geltende Gesetze und Richtlinien
- b) Betriebsprogramm zum Zeitpunkt des bisher umfangreichsten Verkehrsgeschehens
- c) Betriebsprogramm vor Beginn der Umbaumaßnahme
- d) zukünftiges Betriebsprogramm
- e) vorliegende und geplante Flächennutzungen
- f) Planungsunterlagen zum Bauvorhaben
- g) Eigentumsverhältnisse
- h) Aussagen aus den schalltechnischen Untersuchungen
- i) Aussagen zu den vorhandenen Übertragungsverhältnissen

*zu a) Bundesimmissionsschutzgesetz , 16. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (in Anlehnung ), DIN 4150, DIN 45669, VDI-Richtlinie 2057, VDI-Richtlinie 2058, Akustik 23 etc.*

*zu g) Ist die DB AG Eigentümer, kann das betroffene Anwesen aus der Untersuchung herausgenommen werden.*

*zu h) die Randparameter beider Gutachten müssen übereinstimmen*

*zu i) sind innerhalb der hier beschriebenen Art der Durchführung der Beweis-sicherung vorhanden*

## 6. Beurteilung der Erschütterungen und des sekundären Luftschalls, Normen und Richtlinien

### 6.1 Allgemeines, Rechtslage

Obwohl die Eisenbahn in vielen Belangen als das umweltfreundlichste Verkehrsmittel gelten kann, ist es erklärtes Unternehmensziel der DB AG, alles zu tun, um bestehende Belästigungen, soweit technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar, zu reduzieren. Gerade bei Fragen des Erschütterungsschutzes besteht die Möglichkeit, diesen Gesichtspunkt in der Öffentlichkeit immer wieder deutlich zu machen. Dabei ist darauf hinzuweisen, daß es z. Z. keine gesetzlichen Regelungen für die Beurteilung von Erschütterungs-Immissionen gibt.

Für den Planer bedeutet das, daß er die Erschütterungsproblematik im Nahbereich von Schienenwegen in seine Überlegungen mit einbeziehen muß, da, anders als beim Luftschall, Schutzmaßnahmen nur beschränkt zur Verfügung stehen. Nach § 41 Abs. 1 BImSchG ist beim Bau oder der wesentlichen Änderung von öffentlichen Straßen sowie von Eisenbahnen und Straßenbahnen sicherzustellen, daß durch diese keine schädlichen Umwelteinwirkungen durch Verkehrsgerausche hervorgerufen werden können, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind.

Das gilt auch für die Verordnungsermächtigung des § 43 Abs. 1 BImSchG, die die Grundlage für die 16. BImSchV (Verkehrslärmschutzverordnung) ist. Da hier Erschütterungen nicht angesprochen werden, fehlt für eine Festlegung von Grenzwerten für den Schienenverkehr z. Z. die Rechtsgrundlage. Das erschwert dem Planer die Beurteilung einer bestehenden und einer zukünftigen Erschütterungssituation ganz erheblich.

## 6.2 Beurteilung von Erschütterungs-Immissionen (KB-Werte)

Bei der Planung von NBS- bzw. ABS-Strecken sind, bezüglich der Körperschall- und Erschütterungs-Immissionen, zwei grundsätzliche Situationen zu unterscheiden:

### 6.2.1 Vorgehensweise bei NBS-Strecken ohne Vorbelastung

Bei NBS-Strecken wird im Planfeststellungsverfahren auch eine Aussage über die zu erwartende Erschütterungsbelastung durch den zukünftigen Schienenverkehr in den angrenzenden Gebäuden gefordert.

Aufgrund fehlender gesetzlicher Grenzwerte ziehen die Gerichte im Streitfall zur Beurteilung die DIN 4150 Teil 2 "Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden" vom Dezember 1992 und deren Änderungen A1 und A2 als Äußerung einschlägigen Sachverständigen heran /4/. Dieses Normblatt nennt Anhaltswerte für Erschütterungs-Immissionen von neu zu bauenden Strecken, bei deren Einhaltung nicht mit erheblichen Belästigungen zu rechnen ist. Über die Wirkung von Erschütterungs-Immissionen durch den Schienenverkehr auf den Menschen war zum Zeitpunkt der Verabschiedung der Norm nur wenig bekannt.

Bei NBS-Strecken ohne Vorbelastung ist daher von einem Gutachter eine Erschütterungsprognose zu erstellen und die Beurteilung anhand der Anhaltswerte der Norm durchzuführen.

Dabei sind die Sonderregelungen für den Schienenverkehr zu beachten.

Bei den zu erwartenden Erschütterungs-Emissionen und -Immissionen handelt es sich, da es bis heute noch keine genauen und wissenschaftlich abgesicherten Berechnungsverfahren gibt, um Abschätzungen, die i. Allg. auf der sicheren Seite liegen. Mögliche Konsequenzen aus den in den Prognosen enthaltenen Unsicherheiten muß daher z. Z. immer der Planer übernehmen.

Der Grad der Belästigung durch Erschütterungen ist von individuellen und die Situation betreffenden Bedingungen abhängig.

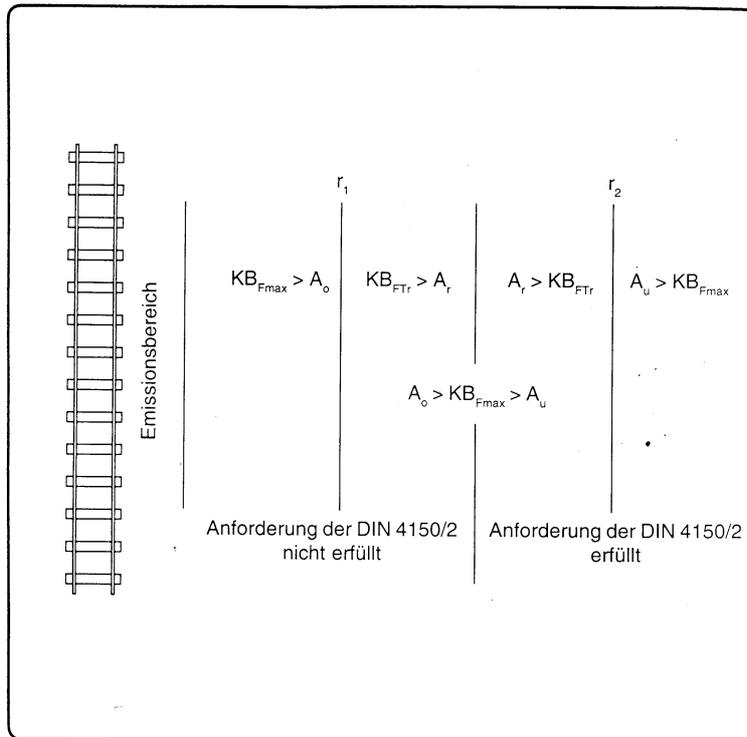
Die in der Tabelle 1 der DIN 4150, Teil 2, enthaltenen Zahlenwerte werden als Anhaltswerte bezeichnet. Damit wird klargestellt, daß es sich bei diesen Werten um empfohlene Werte und nicht um gesicherte Grenzwerte handelt. Eine Überschreitung dieser Werte führt nicht unbedingt zu einer erheblichen Belästigung der in den Gebäuden lebenden Menschen.

Zur Beurteilung der KB-Werte sind die ermittelten und bewerteten maximalen Schwingstärken  $KB_{Fmax}$  mit den Anhaltswerten  $A_u$  (unterer Anhaltswert) und  $A_o$  (oberer Anhaltswert) nach der folgenden Aufstellung zu vergleichen:

- ist  $KB_{Fmax} < A_u$ , so ist die Anforderung eingehalten,
- ist  $KB_{Fmax} > A_o$ , so ist die Anforderung nicht eingehalten,
- ist  $KB_{Fmax} > A_u$  aber  $< A_o$ , so sind die Anforderungen dieser Norm dann eingehalten, wenn die Beurteilungsschwingstärke  $KB_{FT}$  nicht größer ist als der Anhaltswert  $A_r$ . Der Anhaltswert  $A_r$  ist von der Gebietsnutzung und vom Beurteilungszeitraum (Tag/Nacht) abhängig.

Bild 9 stellt diese Bearbeitungsweise graphisch dar(Quelle /18/).

Bild 9:



Eine Beurteilung hat für jeden Einzelfall, auch unter Berücksichtigung der Meßunsicherheit bei der Ermittlung der KB-Werte, zu erfolgen.

### 6.2.2 Vorgehensweise bei NBS- bzw. ABS-Streckenabschnitten mit Vorbelastung

Durch den Eisenbahnverkehr auf bestehenden Strecken sind die anliegenden Bauungsgebiete durch Erschütterungs-Immissionen vorbelastet.

Für die Planer ist diese Situation vorteilhaft, weil die für eine Prognose der Körperschall-Immission relevanten Parameter (Körperschallausbreitungsbedingungen im Erdboden und in den betroffenen Gebäuden) für jeden Einzelfall meßtechnisch genau erfaßt werden können.

Im Falle eines erheblichen baulichen Eingriffs im Sinne der 16. BImSchV werden daher in dicht besiedelten Wohnbereichen in repräsentativen Gebäuden die derzeitigen Körperschall-/Erschütterungs-Immissionen ermittelt (Beweissicherungsmessungen). Dabei ist ein Zugkollektiv zugrunde zu legen, das die Belastung der Strecke repräsentiert. Mit den Ergebnissen aus den Messungen wird für jeden Einzelfall eine Prognose erstellt.

Wegen der oben dargestellten Rechtslage kann die DB AG nur zusagen, durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen, daß sich nach der Durchführung der Baumaßnahmen die Erschütterungs-Immissionen im Vergleich zum Istzustand nicht fühlbar erhöhen. Dabei wird ein prognostizierter Mittelwert von  $KB_{Fmax} = 0,4$  von allen Ereignissen noch als zumutbar angesehen. Weitergehende Forderungen würden Fragen der Vorsorge bzw. Sanierung ansprechen, die letztlich vom Gesetzgeber geregelt werden müßten.

( $KB_{Fmax} = 0,4$  ist nach Untersuchungen zur Lästigkeit von Erschütterungen an Schienenwegen der Immissionswert, ab dem sich mehr als 50% der betroffenen Anwohner erheblich belästigt fühlen /12/).

Zur Veranschaulichung der hier ermittelten  $KB_{F_{max}}$ -Werte im Zusammenhang mit der subjektiven Wahrnehmung kann die Tabelle 1 der VDI 2057, Blatt 3, herangezogen werden.

- Ein KB-Wert von 0,1 entspricht der Fühlbarkeitsschwelle.
- Der Bereich des KB-Wertes von 0,1 bis ca. 0,4 entspricht der Bewertung „gerade spürbar“.

Die Empfehlung des Mittelwertes von  $KB_{F_{max}} = 0,4$  wird bereits im Gerichtsurteil des Bayerischen Verwaltungsgerichtshofes als Beurteilungsanhaltswert für die Erheblichkeits-/Zumutbarkeitsschwelle angenommen.

(AZ.: 20 A 93 40080, vom 21. Februar 1995/2/)

Überschreitungen dieser Schwelle bis zu einem Wert von 0,1  $KB_{F_{max}}$  werden als unerhebliche Änderungen beschrieben.

Gemäß dem Gerichtsurteil sind die Erschütterungseinwirkungen, so wie auch die Luftschalleinwirkungen, abwägungserhebliche Belange. Betroffene müssen sich mögliche vorhandene Vorbelastungen zurechnen lassen; d. h., daß sie bei der Abwägung zu berücksichtigen sind. Das entspricht auch der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts zum primären Luftschall vor Inkrafttreten der 16. BImSchV.

Zur Bewertung, ob die Durchführung einer Baumaßnahme zu einer erheblichen Erhöhung der Erschütterungseinwirkungen geführt hat, sind Nachmessungen durchzuführen. Sollten die Vorsorgemaßnahmen nicht ausreichen und sind für die Betroffenen nicht hinnehmbare Beeinträchtigungen eingetreten, so können sie Rechte nach § 75, Abs. 2, VwVfG geltend machen.

Ausgleichsansprüche bestehen folglich nur, wenn es, im Vergleich zu der vorhandenen Vorbelastung, durch die Baumaßnahme zu einer Erhöhung der Erschütterungseinwirkungen kommt und wenn gerade in dieser Erhöhung eine zusätzliche unzumutbare Beeinträchtigung liegt.

Bei Raumordnungs- bzw. Planfeststellungsverfahren wird daher für den Fall einer Vorbelastung folgender Wortlaut zur Aufnahme in die Beschlüsse vorgeschlagen:

*„Aufgrund der Ergebnisse der Beweissicherungsmessungen und der Prognose verpflichtet sich die Deutsche Bahn, nach Inbetriebnahme der ABS-Strecke den vor Beginn der Baumaßnahme gemessenen Immissionswert einzuhalten.*

*Dazu wird die DB AG von einem neutralen Gutachter Kontrollmessungen an ausgewählten Immissionsorten, analog der Beweissicherungsmessungen, vornehmen lassen.*

*Sollten die Ergebnisse eine **wesentliche** Erhöhung der zugesicherten Erschütterungs-Immissionen ergeben, so wird in jedem Einzelfall über Abhilfemaßnahme entschieden“.*

### **Empfohlene Bewertungskriterien**

Bis zur endgültigen Klärung dieser Probleme sind wir der Meinung, daß nach der Fertigstellung baulicher Maßnahmen keine erheblichen Erhöhungen der Erschütterungssituationen auftreten dürfen. Die genannte Zumutbarkeitsschwelle ( $KB_{F_{max}} < 0,4$ ) ist dabei zu berücksichtigen.

Bei vorhandener Erschütterungsvorbelastung soll die Beurteilung erst nach Überschreitung dieser Zumutbarkeitsschwelle erfolgen.

Unter wesentlicher Erhöhung soll eine Erhöhung des KB-Wertes um bis zu 25 % der Bestandssituation verstanden werden. Erschütterungs-Immissionen unterhalb der

Zumutbarkeitsschwelle werden als zulässig betrachtet, was bedeutet, daß die Anforderungen eingehalten werden.

Zur Bewertung der prognostizierten Erschütterungseinwirkungen sollen in einem Zeitraum von 6 - 12 Monaten, ab Inbetriebnahme der neuen Strecken, Nachmessungen durchgeführt werden. Dieser Nachprüfungsvorbehalt ist angesichts der mit der Prognostizierung von Erschütterungseinwirkungen verbundenen Unsicherheiten gerechtfertigt.

### 6.3 Beurteilung des „Sekundären Luftschalls“

Die Erfahrung zeigt, daß an oberirdischen Strecken während der Zugvorbeifahrt der direkt einfallende Luftschall i. Allg. überwiegt. Das gilt besonders für höher gelegene, der Bahntrasse zugewandte und nicht übermäßig schallgedämmte Räume. Bei schallgedämmten, der Bahntrasse abgewandten Räumen, bei Tunnelstrecken und dort, wo im Rahmen der Baumaßnahme gleichzeitig umfangreiche Lärmvorsorge erforderlich wird, kann jedoch der sekundäre Luftschall einen beträchtlichen Anteil am gesamten Innenraumpegel erreichen /14/.

Bei oberirdisch verlaufenden Strecken kann der sekundäre Luftschallanteil meßtechnisch nur mit unzumutbar großem Aufwand erfaßt werden, da er gleichzeitig mit dem direkt einfallenden Luftschall auftritt. Deshalb hat das damalige BZA München eine Untersuchung durchführen lassen, bei der die Korrelation zwischen dem in Fußbodenmitte eines Raumes gemessenen Körperschall-Schnellepegel (Erschütterungsgröße) und dem abgestrahlten sekundären Luftschallanteil ermittelt wurde /5/. Damit steht eine Methode zur Verfügung, diesen Luftschallanteil zu prognostizieren.

Für die Beurteilung des sekundären Luftschalls wurden in dem oben genannten Gerichtsurteil die Mittelungswerte der VDI 2058, Blatt 1, herangezogen.

- Mittelungspegel tags: 35 dB(A)
- Mittelungspegel nachts: 25 dB(A)

Das Gerichtsurteil erwähnt allerdings als Richtwerte nur die Mittelungswerte und nicht, wie in der VDI 2058, Blatt 1, angegeben, die Maximalwerte.

(Maximalpegel bis zu 10 dB(A) über den Mittelungswerten sind noch akzeptabel).

Eine wesentliche Erhöhung des sekundären Luftschalls wurde gemäß dem primären Luftschall mit 3 dB(A) festgelegt (entsprechend dem Anhang 2 zur 16. BImSchV).

In dem Gerichtsurteil bleibt die Frage offen, ob zur Bestimmung des zumutbaren Innenschallpegels der primäre und der sekundäre Luftschall zu addieren sind, oder ob ein Schienenbonus (von 5 dB(A)) bei der Beurteilung des sekundären Luftschalls zu berücksichtigen ist.

Wir sind der Meinung, daß der sekundäre Luftschallpegel getrennt vom primären Luftschallpegel beurteilt werden sollte, wobei der Schienenbonus gemäß dem primären Luftschall zu berücksichtigen ist.

Begründung:

- Der primäre Luftschall kann durch geeignete passive Maßnahmen „Schallschutzfenster mit hoher Schalldämmung“ weitgehend unterdrückt werden.
- Der Schienenbonus gilt wegen des geringeren Lästigkeitscharakters der Schienengeräusche sowohl für den primären als auch für den sekundären Schallpegel.

**Immissionsrichtwerte (Beurteilungspegel) für zumutbare Innenraumpegel  $L_i$  bei geschlossenem Fenster bei NBS-Strecken (ohne Vorbelastung)**

Nutzung	Wohnräume/Tag $L_{iT}$ (in dB(A))	Schlafräume/Nacht $L_{iN}$ (in dB(A))
1. Krankenhäuser, Schulen Kurheime, Altenheime	33	28
2. reine und allg. Wohngebiete u. Kleinsiedlungsgebiete	35	30
3. Kern-, Dorf- und Misch- gebiete	40	35
4. Gewerbegebiete	45	40

Aus der Sicht der DB AG können diese Werte, die für den Neubau eines Schienenweges festgelegt worden sind, sinngemäß auch zur Beurteilung des sekundären Luftschallanteils herangezogen werden.

Auch wenn sie derzeit noch keinen rechtsverbindlichen Charakter haben, so scheinen sie neuerdings aber auch vom Umweltbundesamt Berlin und von den gesetzgebenden Gremien akzeptiert zu werden.

Bei Ausbaustrecken (Bahnstrecken mit Vorbelastung) wird der sekundäre Luftschall nach den Kriterien der „wesentlichen Änderung“ beurteilt. Erst wenn die o. g. Innenraumpegel überschritten und die Pegelerhöhung mehr als 3 dB(A) sind, bestehen Ansprüche auf Schutzmaßnahmen.

## 7. Körperschall-Schutzmaßnahmen

Nach der Intension des Bundesimmissionsschutzgesetzes gemäß § 41, Abschnitt 2, sollen die Aufwendungen für Schutzmaßnahmen in einem angemessenen Verhältnis zum Schutzzweck stehen. Aus diesem Grund ist die Einsatzmöglichkeit jeder Maßnahme durch eine Kosten-/Nutzen-Analyse zu überprüfen.

Da es zahlreiche Möglichkeiten zur Vermeidung oder Verminderung von Erschütterungseinwirkungen in einem Bauwerk oder in den Erdboden gibt, muß die Wirksamkeit jeder Maßnahme von Fall zu Fall genau untersucht werden. Im folgenden werden einige dieser Maßnahmen kurz vorgestellt.

### 7.1 Elastische Lagerung des Oberbaus

Um bei Schienenverkehrswegen den Oberbau vom Unterbau schwingungstechnisch durch eine richtig dimensionierte elastische Lagerung zu isolieren, ist es absolut erforderlich, die Lage der Systemresonanzen der elastischen Lagerung im Verhältnis zur Deckenresonanz des zu schützenden Raumes zu kennen. Eine falsche Dimensionierung der Systemresonanz kann die Maßnahme nicht nur wirkungslos machen, sie kann sogar zu einer Erhöhung der Erschütterungs-Immissionen führen.

#### 7.1.1 Unterschottermatten

Unterschottermatten (USM) werden vollflächig zwischen dem Schotterbett und einem „Betonplanum“ verlegt.

Die in der TL 918 071 (Technische Lieferbedingungen - Unterschottermatten) festgelegten statischen Steifigkeiten der Matten lassen erfahrungsgemäß erst ab 30 Hz eine akustische Wirkung erwarten.

Aus diesem Grund ist der Einbau von USM keine geeignete Maßnahme, um Erschütterungs-Immissionen bei Gebäuden mit niedriger Deckenresonanzfrequenz zu vermeiden bzw. zu reduzieren, auch wenn eine wirksame Reduzierung der sekundären Luftschall-Immissionen erreicht werden könnte.

Unterschottermatten werden vorzugsweise in Tunnelbauwerken und auf Brücken eingesetzt.

Da auf der freien Strecke der dort ggf. notwendige Einbau von Betontrögen sehr kostenintensiv ist, scheidet der Einbau von USM aus.

#### 7.1.2 Masse-Feder-Systeme

Die einzige derzeit bekannte und auch erprobte Maßnahme am Oberbau, die eine wirksame Reduzierung der Erschütterungs-Immissionen bei Gebäuden mit sehr niedrigen Deckenresonanzfrequenzen erwartet läßt, ist der Einbau eines Masse-Feder-Systems mit einer niedrigen Abstimmfrequenz (unter 10 Hz).

Das System besteht aus schweren Ort- oder Fertigbetonplatten (große Masse), die körperschalldämmend auf einzelnen Elastomer-Lagern liegen.

Auf diesen Tragplatten, die auch als Schottertrog ausgeführt werden können, wird dann der Fahrweg verlegt.

Masse-Feder-Systeme führen im allgemeinen auch zu einer deutlichen Reduzierung des sekundären Luftschalls.

Wegen der sehr hohen Kosten wird diese Maßnahme in den meisten Fällen nicht realisierbar sein und nur bei ganz besonderen Fälle zum Einsatz kommen.

## **7.2 Elastische Schienenlagerung**

### **7.2.1 Elastische Schienenbefestigung**

Zwischen Schwelle und Rippenplatte werden elastische Zwischenplatten (Zwp) eingebaut.

Weil auf diese Weise die Einleitung von Schwingungsenergie ganz erheblich reduziert werden kann, wurden z.B. in Brückenbauwerken mit schotterlosem Oberbau elastische Schienenbefestigungen mit Erfolg eingebaut.

Die Wirksamkeit dieser Maßnahme auf der freien Strecke mit Schotteroberbau ist bisher noch nicht ausreichend untersucht worden.

### **7.2.2 Kontinuierliche Schienenlagerung**

Bei dieser Art der Lagerung wird die Schiene lückenlos in eine Vergußmasse eingebettet. Die statische Steifigkeit der Vergußmasse muß aus betriebs- und fahrtechnischen Sicherheitsgründen sehr hoch gewählt werden. Die dadurch bedingte hohe dynamische Steifigkeit, die für die Körperschallisolierung relevant ist, läßt kaum eine spürbare Körperschallminderung zu.

### **7.2.3 Elastische Schwellenlagerung**

Bei dieser Maßnahme werden mit Elastomermaterialien ummantelte Betonschwellen im herkömmlichen Schotterbett verlegt, wobei die Schienen starr an den Schwellen angekoppelt werden.

Diese Lösung läßt eine gute Körperschalldämmende Wirkung erwarten.

Da die Maßnahme derzeit nur für Forschungszwecke untersucht worden und damit noch nicht ausgereift und zugelassen ist, kann sie noch nicht in Betracht gezogen werden.

## **7.3 Vergleich von Oberbauarten (Feste Fahrbahn / Schotteroberbau)**

Für eine eindeutige Aussage liegen bisher noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor.

Erste Ergebnisse aus vergleichenden Untersuchungen lassen erwarten, daß die Feste Fahrbahn (mit einer elastischen Schienenbefestigung) eine bessere Körperschalldämmende Wirkung aufweist als z.B. ein Schottergleis. Das wird sich voraussichtlich auf die Erschütterungs-Immissionen spürbar pegelmindernd auswirken. Über die Höhe dieser Pegelminderung kann z. Z. noch keine endgültige Aussage gemacht werden. In dem für die Erschütterung relevanten Frequenzbereich sind Pegelminderungen im Mittel von 5 - 10 dB gemessen worden.

Auch wenn nicht quantifiziert werden kann, welchen Anteil an diesem Ergebnis die Betonplatte hat, so ist doch anzunehmen, daß sich ihre Masse erschütterungsmindernd auswirkt.

Leider erhöht sich das Rollgeräusch bei Fahrt auf der Festen Fahrbahn gegenüber der Fahrt auf Schotteroberbau. Das beruht darauf, daß die schallabsorbierende Wirkung des Schotters fehlt und daß bei den heutigen Bauarten die Schiene durch die elastischen Schienenbefestigungen von der Betonfahrbahn abgekoppelt ist.

Diese Überhöhung, die bei der nicht absorbierenden Festen Fahrbahn erfahrungsgemäß bei 5 bis 7 dB(A) liegt, tritt bei der absorbierenden Festen Fahrbahnen in diesem Umfang nicht auf.

#### 7.4 Maßnahmen im Ausbreitungsweg

Mit einem offenen Bodenschlitz, der im Nahbereich des zu schützenden Gebäudes angeordnet wird, läßt sich die Ausbreitung der Oberflächenwellen abschirmen. Weiter entfernt gelegene Orte werden dagegen kaum abgeschirmt.

Zur dauerhaften Standsicherheit werden in den Schlitz gas- oder luftgefüllte Hohlkörpermatten aus Alufolien, Polyäthylenfilmen o. ä. eingelegt.

Die erforderliche Schlitztiefe richtet sich nach den zu betrachtenden Wellenlängen der abzuschirmenden Schwingungen (zwischen 10 und 15 m).

Die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist begrenzt und aus Kostengründen oft nicht durchführbar.

#### 7.5 Maßnahmen am Objekt

Zur Reduzierung der Erschütterungs-Immissionen können auch Maßnahmen am Gebäude selbst eingesetzt werden. Diese Maßnahmen befinden sich allerdings noch im Versuchsstadium und sind bisher kaum eingesetzt worden.

In einzelnen Fällen könnte eine Versteifung der Raumdecken in Betracht gezogen werden, um ein Zusammenfallen der Deckenresonanzfrequenzen mit den Anregungsfrequenzen zu vermeiden.

Mit entsprechendem technischem Aufwand ist auch die elastische Lagerung eines ganzen Gebäudes möglich. Dabei können Elastomerlager oder Stahlfedern die Gebäudelasten direkt an den Fundamenten oder über die lastverteilende Kellerdecke aufnehmen.

Die Durchführung dieser Maßnahme ist äußerst wirkungsvoll. Wegen der sehr hohen Kosten muß aber über ihre Realisierung von Fall zu Fall entschieden werden.

Der Einsatz von elastischen Matten (Sylomermatten) vor und neben dem Gebäudefundament (im Erdreich, ca. 2,5 m tief) wurde an einem Wohnhaus (Neubau) erprobt. Als Ergebnis konnte eine Reduzierung der KB-Werte um den „Faktor 2“ nachgewiesen werden, d. h., daß sich die KB-Werte halbiert haben /15/.

Diese Ergebnisse sind statistisch noch nicht abgesichert. Auf alte Wohnhäuser mit Holzbalkendecken können sie nicht ohne weiteres übertragen werden.

#### 7.6 Entschädigungszahlungen

Sind wirkungsvolle Schutzmaßnahmen, aus welchen Gründen auch immer, nicht durchführbar, so bleibt nur noch eine Entschädigungszahlung an den jeweiligen Hauseigentümer bzw. der Erwerb des Gebäudes durch den Baulastträger .

#### 8. Ausblick

Für den Bereich Körperschall / Erschütterungen muß unbedingt ein einheitliches Prognosemodell erarbeitet werden.

## 9. Quellen:

- /1/ DIN 45669, Teil 1: Messungen von Schwingungsimmissionen, Anforderungen an Schwingungsmesser 1981
- /2/ DIN 45669, Teil 2: Messungen von Schwingungsimmissionen, Meßverfahren 1984 DIN 45669, Teil 2A1: Messungen von Schwingungsimmissionen, Meßverfahren, Änderung 1, 1989
- /3/ DIN 45672, Teil 1: Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen, Meßverfahren, 1991
- /4/ DIN 4150, Erschütterungen im Bauwesen Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden (Dezember 1992)
- /5/ Grütz, H.-P., Said, A.: Zur Ermittlung des sekundären Luftschalls aus oberirdischem Schienenverkehr. Fortschritte der Akustik - DAGA '92: Bad Honnef 1992
- /6/ Fleischer/Said: Vibra-DB, Datenbank für Körperschall- und Erschütterungsmessungen an Schienenwegen der Deutschen Bahn AG, Dez. 1995 (Bericht 11083-6/G.001)
- /7/ Said/Fleischer: statische Auswertungen von Erschütterungsereignissen infolge von Eisenbahnbetrieb, Vergleich zwischen  $L_{eq}$  und Max-Hold Methoden (OPB-Bericht, noch nicht veröffentlicht)
- /8/ Hölzl, G. Fischer G., Körperschall- bzw. Erschütterungsausbreitung an oberirdischen Schienenverkehrswegen, ETR 34 (1985), H.6- Juni.
- /9/ Said/Fleischer. Körperschallmessungen zur Ermittlung der spektralen hausspezifischen Übertragungsfaktoren - Vergleich zwischen Bahn- und Fremdanregung, OPB Bericht Nr. 10448-14, August 1994, im Auftrag der Bahn AG
- /10/ Said/Fleischer: Schalltechnische Untersuchungen zur Ermittlung der Übertragungsfaktoren von Wohnhäusern unterschiedlicher Bauarten infolge von Erschütterungsereignissen aus oberirdischem Schienenverkehr, OPB-Bericht 5617-3/2 im Auftrag der Bahn AG
- /11/ Said/Fleischer: Rechenprogramm zur Ermittlung von Erschütterungsimmissionen in Gebäuden, OPB-Bericht Nr. 10085-3, Mai 1993, im Auftrag der Bahn AG
- /12/ Zeichart, K., Sinz, A., Schuemer-Kohrs, A., Schuemer, R.: Erschütterungen durch Eisenbahnverkehr und ihre Wirkungen auf Anwohner. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 41 (1994) Heft 2 und 4.
- /13/ Hölzl, G., Körperschall- bzw. Erschütterungsausbreitung an Schienenwegen, Ergebnisse des Forschungsvorhabens und praktische Anwendungen bei der DB, ETR 31 (1982), H.12-Dezember.
- /14/ Said, A.: Schalltechnische Untersuchungen zur Bestimmung des sekundären Luftschalls aus dem oberirdischen Schienenverkehr, OPB-München, Projekt Nr. 10085-1 vom Okt. 1992

- /15/ Said A., Fleischer D.: Körperschalldämmende Maßnahmen am Gebäude gegen Erschütterungsimmissionen aus dem oberirdischen Schienenverkehr, OPB München, Projekt Nr. 10448/5 vom November 1993
- /16/ Diplomarbeit D. Fleischer: Vergleichbarkeit unterschiedlicher Ankopplungs- und Auswertemethoden bei bahnspezifischen Erschütterungssignalen, Juni 1992
- /17/ Hölzl, G., Holm P., Müller G., Akustische Vorteile der Festen Fahrbahn gegenüber dem Schotteroberbau bei tiefen Frequenzen, ETR 45 (1996), H. 1-2, Januar/Februar.
- /18/ Ackva J., Decker U., Niedermeyer S., IGI Niedermeyer Institute, IGI-Heft Nr. 14 von 2/95 „Erschütterungen aus dem Schienenverkehr“