

Körperschall an Schienenverkehrswegen

Gastbeitrag im Rahmen der Vorlesung Technische Akustik II

Am Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik der TU Berlin

von

Dr.-Ing. habil. Rüdiger G. Wettschureck

Beratender Ingenieur für Technische Akustik

Email: post@wettschureck-acoustics.eu

Web: <http://www.wettschureck-acoustics.eu>

Grundlagen dieses Beitrags:

Wettschureck R. G., Hauck G., Diehl R. J., Willenbrink L., „Geräusche und Erschütterungen aus dem Schienenverkehr“, Kapitel 17 in „Taschenbuch der Technischen Akustik“, von G. Müller und M. Möser (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London et al., 3. Auflage, Dezember 2003

Weitere Quellen werden gegebenenfalls auf den jeweiligen Folien angegeben!

Inhaltsübersicht

- **Akustische & bahntechnische Grundlagen**
 - Schnellepegel - Beschleunigungspegel - Zeigerdarstellung
 - Zeitbewertung - Bewertete Schwingstärke - KB-Wert
 - Körperschall-Entstehungsmechanismen im Rad/Schiene-Kontaktbereich
 - Körperschallausbreitung im Boden - Körperschalleinleitung in Gebäude
- **Körperschall-Minderungsmaßnahmen**
 - Körperschalldämmung: Grundlagen - Begriffe - Definitionen
 - Fahrweg - Oberbau → **Schotteroberbau** → **Feste Fahrbahn** - Unterbau
 - Prinzipien: am Gleis/Oberbau - im Ausbreitungsweg - an Gebäuden
 - Maßnahmen im Bereich von: Schiene - Schwelle - Schotter - Gleitragplatte
 - Rad/Schiene-Impedanzmodell → **Rechenmodell** - **Unterschottermatten**
- **Beispiele für die Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen**
 - S-Bahn Berlin, Tunnel-Bahnhof Friedrichstraße: **Unterschottermatten**
 - S-Bahn München, Stahlbeton-Verbundbrücke Mü-Laim: **Unterschottermatten**
 - S-Bahn Köln, Tunnel Chorweiler: **Masse-Feder-System + Unterschottermatten**
- **Schlussbemerkungen - Aktuelles**

Akustische & bahntechnische Grundlagen

- Allgemeines - Begriffe - Definitionen

Schnellepegel - Beschleunigungspegel

- Die wichtigste Größe zur Kennzeichnung von Körperschall ist der Körperschall-Schnellepegel oder kurz → **Schnellepegel L_v**

$$L_v = 20 \cdot \lg \frac{v}{v_0} \text{ dB}$$

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

- Messgröße ist meist die → **Schwingbeschleunigung a** , die in der Regel mit piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern gemessen wird.
- Der → **Beschleunigungspegel L_a** ist wie folgt definiert:

$$L_a = 20 \cdot \lg \frac{a}{a_0} \text{ dB}$$

a Effektivwert der Schwingbeschleunigung in m/s^2
 a_0 Bezugswert = 10^{-6} m/s^2 (heute allgemein üblich)
Gebräuchlich war u.a. auch $a_0 = \pi \cdot 10^{-4}$ m/s^2

- Der Schnellepegel L_v wird zur Kennzeichnung schwingender Strukturen und zur Beschreibung der → **Körperschallübertragung** verwendet
- Auch bei der Ermittlung der Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen ist L_v eine charakteristische Größe, siehe → **Einfügungsdämm-Maß**

Zeigerdarstellung für periodische Vorgänge

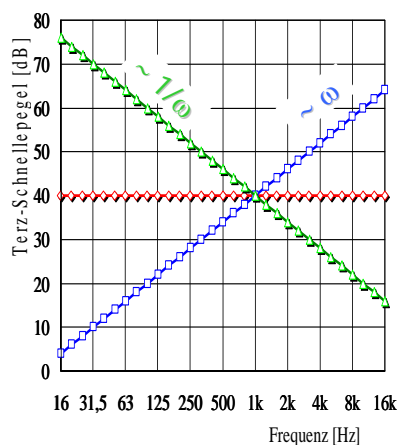
- Schwingbeschleunigung a , Schwingschnelle v und Schwingweg x sind für periodische Vorgänge, die wir praktisch immer voraussetzen können, bei Anwendung der → **Zeigerdarstellung** wie folgt miteinander verknüpft:

$$|a| = \left| \frac{d}{dt} \left(\hat{v} \cdot e^{j\omega t} \right) \right| = |j\omega \cdot v| = \omega \cdot |v|$$

$$|x| = \left| \int \left(\hat{v} \cdot e^{j\omega t} \right) \cdot dt \right| = \left| \frac{v}{j\omega} \right| = \frac{1}{\omega} \cdot |v|$$

- Darin bedeuten neben den bereits genannten Größen a , v und x :
 - $\omega = 2\pi f$, die Kreisfrequenz in s^{-1}
 - f die Frequenz in Hz
 - j die imaginäre Einheit (dimensionslos)

Schnellepegel - Beschleunigungspegel - Wegpegel



Beschleunigungspegel-Spektrum
[dB re. $\pi \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$]

$$L_a = 20 \cdot \lg \frac{a}{a_0} = 20 \cdot \lg \frac{v}{v_0} + 20 \cdot \lg \omega \quad \text{dB}$$

Schnellepegel-Spektrum [dB re. $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$]
(siehe z.B. „Rosa Rauschen“)

$$L_v = 20 \cdot \lg \frac{v}{v_0} \quad \text{dB}$$

Wegpegel-Spektrum [dB re. $8 \cdot 10^{-12} \text{ m}$]

$$L_x = 20 \cdot \lg \frac{x}{x_0} = 20 \cdot \lg \frac{v}{v_0} - 20 \cdot \lg \omega \quad \text{dB}$$

Gleitender Effektivwert - Zeitbewertung

- Bei Messungen an Schienenverkehrswegen wird die Messgröße in der Regel als → **gleitender Effektivwert** registriert
- Das ist die zeitliche Mittelung der Messgröße - wie z.B. der Schwinggeschwindigkeit v - mit einer exponentiell zeitabhängigen Gewichtung durch eine → **Zeitkonstante τ**
- Danach gilt z.B. für den Schnellepegel $L_v(t)$:

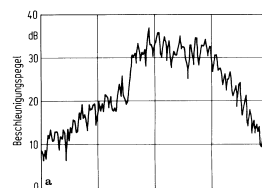
$$L_v(t) = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{v_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t e^{-\frac{(t-\xi)}{\tau}} \cdot v(\xi)^2 \cdot d\xi} \right]^2 \text{ dB}$$

- Darin bedeuten, neben dem Effektivwert $v(\xi)$ der Schwinggeschwindigkeit:
 - τ Zeitkonstante
 - ξ Integrationsvariable
 - v_0 Bezugsschnelle = $5 \cdot 10^{-8}$ m/s
- Diese Art der Mittelung nennt man → **exponentielle Mittelung**

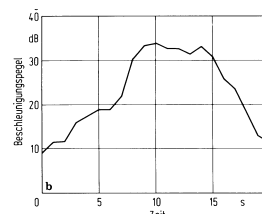
Gleitender Effektivwert - Zeitbewertung

Folgende Zeitkonstanten sind in der Messtechnik gebräuchlich:
(Veranschaulicht am Beispiel des Beschleunigungspegel-Zeitverlaufs einer Zugvorbeifahrt)

A) Zeitbewertung → „**FAST**“
Zeitkonstante $\tau = 0,125$ s



B) Zeitbewertung → „**SLOW**“
Zeitkonstante $\tau = 1,0$ s



Erschütterungen - Bewertete Schwingstärke $KB_F(t)$

- Bevorzugtes Signal bei der Beurteilung von Erschütterungen nach der DIN 4150, Teil 2, ist die → **Schwingschnelle**,
- Die Schwingschnelle wird entweder direkt gemessen oder aus der Schwingbeschleunigung durch Integration ermittelt,
- Nach Frequenzbewertung durch das sogenannte → **KB-Filter** mit der Grenzfrequenz von $f_0 = 5,6$ Hz gewinnt man aus der Schwingschnelle die → **Schwingstärke KB**,
- Beim Schienenverkehr ist diese Frequenzbewertung nicht von Bedeutung, weil bei Frequenzen < 10 Hz keine nennenswerten Signalanteile auftreten,
- Frequenzen oberhalb 80 Hz tragen bei Erschütterungseinwirkungen auf Menschen in Gebäuden nicht wesentlich zur Wahrnehmung bei,
- Diese Signalanteile werden daher bei der KB-Bewertung durch ein Sperrfilter abgeschnitten.

Quelle: DIN 4150-2 "Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden", 1999-06

Erschütterungen - Bewertete Schwingstärke $KB_F(t)$

- Nach Bildung des gleitenden Effektivwerts unter Verwendung der Zeitbewertung „FAST“ erhält man als Maß für die Wahrnehmung von Erschütterungen die → **bewertete Schwingstärke $KB_F(t)$** :

$$KB_F(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t e^{-\frac{(t-\xi)}{\tau}} \cdot KB(\xi)^2 \cdot d\xi} \quad dB$$

τ Zeitkonstante
 ξ Integrationsvariable
 F Zeitbewertung Fast
 (mit $\tau = 125$ ms)

- Die praktische Bedeutung dieser Mess- und Beurteilungsgröße wird später im Zusammenhang mit einem Tunnelprojekt bei der S-Bahn in Köln gezeigt,
- Weitere abgeleitete Beurteilungsgrößen finden sich in der DIN 4150, Teil 2

Quelle: DIN 4150-2 "Erschütterungen im Bauwesen; Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden", 1999-06

Fahrweg des Schienenverkehrs

- Der → **Fahrweg** besteht aus Gleisen, Weichen und Kreuzungen
- Der konstruktive Aufbau ist gegliedert in **Oberbau - Unterbau - Untergrund**
- Wir unterscheiden die Oberbauarten → **Schotteroberbau** und → **Feste Fahrbahn**
- Als Untergrund kann ein → **Erdbauwerk** oder ein → **Kunstabauwerk** dienen
- Folgende Tabelle beschreibt beispielhaft den Aufbau auf einem **Erdbauwerk**

Oberbauart		Bezeichnung
Schotteroberbau (SchO)	Feste Fahrbahn (FF)	Oberbau
Schiene, Schienenbefestigung, Schwelle	Schiene, Schienenbefestigung, FF-Konstruktion	
Gleisschotter (Bettung)	Betontragschicht (BTS) oder Asphalttragschicht (ATS) Hydraulischgebundene Tragschicht (HGT) oder Schottertragschicht (STS)	
Planumsschutzschicht (PSS), Frostschutzschicht (FSS),	Frostschutzschicht (FSS),	Unterbau ¹⁾
Erdbauwerk (Damm bzw. Einschnitt)		
Anstehender Boden		Untergrund ²⁾
Bei Kunstbauwerken	¹⁾ Brücken und Tunnel	²⁾ entfällt

Quelle: Regelwerk Ril 820.0101A02 „Grundlagen des Oberbaus“, DB Netz AG, Ausgabe Dezember 2008

Schotteroberbau – Querschnitt (Prinzipskizze, unmaßstäblich)



Hauptaufgaben der **Schutzschichten** innerhalb der Gesamtkonstruktion sind:

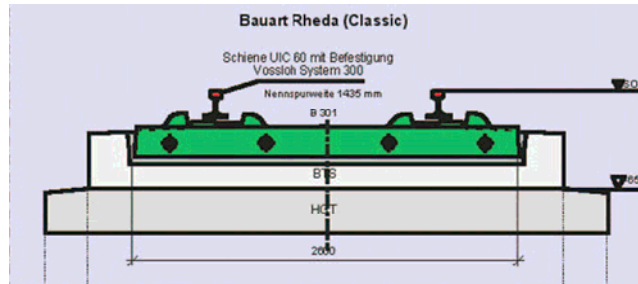
PSS: Seitliches Ableiten von → **Oberflächenwasser** aus dem Schotterbett und Sicherung der → **Standfestigkeit**

FSS: Kapillarbrechende, frostbeständige Schicht zum Erreichen einer ausreichenden → **Frostschutztiefe** sowie zur → **Verhinderung des Aufstiegens von Wasser**

Quellen: <http://www.britpave-bus-rail.org.uk/rail/why-build-slabtrack.html> und <http://www.ohu-iffzheim.de/?id=Seite323>

Feste Fahrbahn verglichen mit Schotteroberbau

Charakteristika aller Bauarten - erläutert am Beispiel der „Bauart Rheda“



- **Schotterlose** Oberbauform
- Schwelle/Tragplatte „starr“ verbunden
- **Gleiselastizität** durch **elastische Zwischenplatte** in der Schienenbefestigung
- Höhere **Schallemission**
- Höchste Anforderung an den Untergrund
→ **Hydraulisch gebundene Tragschicht**
- Aufwändige Montage und hohe Investitionen
- Niedriger Unterhaltungsaufwand
- Wiederherstellung im Havariefall aufwändig

Ausführliche Informationen zur Festen Fahrbahn siehe z.B.: <http://www.fiebig.com/>

Schotteroberbau – Feste Fahrbahn

Beispiele aus Betriebsgleisen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs der DB AG



Bildquelle: <http://www.vossloh-fastening-systems.de>



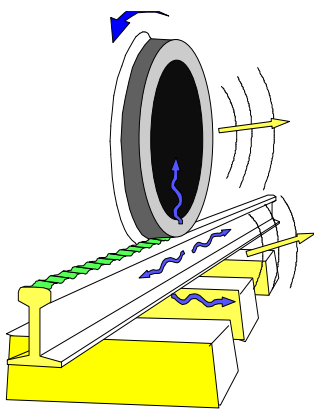
Foto: Max Bögl GmbH

Schotteroberbau, Bauart W60 B70 NBS Würzburg-Hannover

Feste Fahrbahn, „System Bögl“ NBS Nürnberg-Ingolstadt

Körperschallentstehung und -Ausbreitung - Allgemeines - Entstehungsmechanismen -

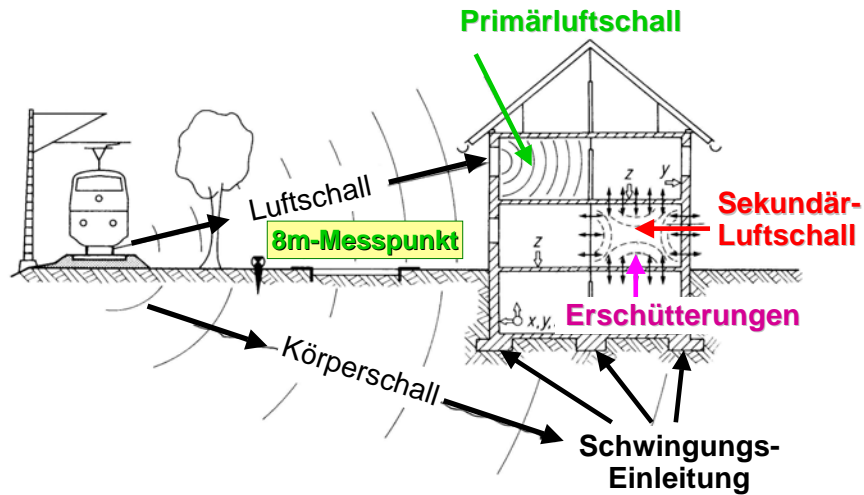
Primär- / Sekundär-Immissionen beim Schienenverkehr



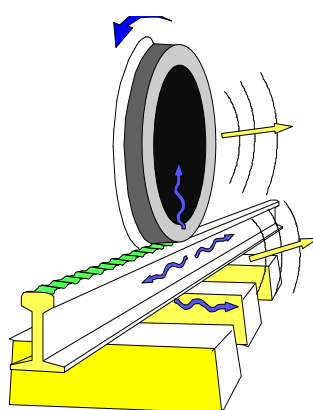
Bildquelle: „TWINS“ - Track
Wheel Interaction Noise Software

- Fahrende Züge erzeugen infolge von Rauigkeiten an Rad-/Schienenaufläcchen ausser dem → **Rollgeräusch** auch → **Schwingungen**, die über den Fahrweg in den Untergrund eingeleitet werden und sich dort ausbreiten
- An der Schnittstelle → **Boden/Fundament** findet eine Übertragung auf benachbarte Gebäude statt, wodurch diese ihrerseits zu Schwingungen angeregt werden → **Körperschall**
- Bei entsprechender Größenordnung können diese Bauteilschwingungen von Menschen als spürbare → **Erschütterungen** wahrgenommen werden
- Gebäudeteile, vorzugsweise Decken und Wände, strahlen Schwingungen auch in die umgebende Luft ab, die dann als sogenannter → **Sekundär-Luftschall** hörbar werden können

Primär- / Sekundär-Immissionen beim Schienenverkehr



Entstehungsmechanismen im Rad/Schiene-Kontaktbereich



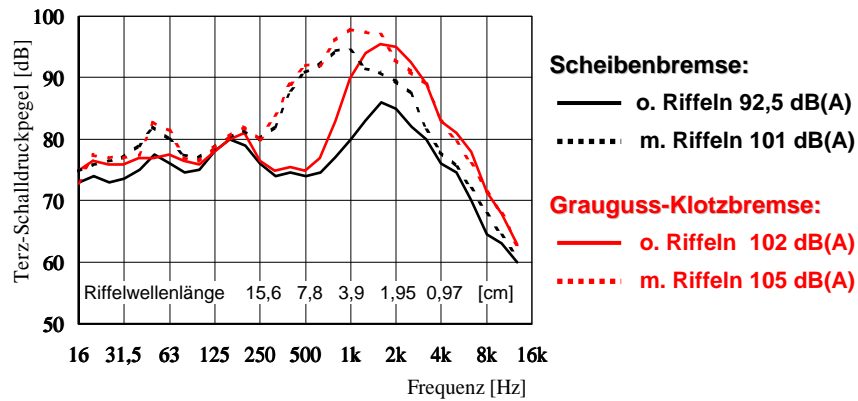
Bildquelle: „TWINS“ - Track Wheel Interaction Noise Software

- **Geschwindigkeitserregung**
infolge geometrischer Formabweichungen bei Rad und Schiene, z.B.
→ **Verriffelung von Rad und Schiene**
- **Parametrische Erregung**
infolge örtlich wechselnder Einsenkung der Schienenfahrfläche aufgrund von örtlich bzw. zeitlich wechselnder Steifigkeit, z.B.
→ **Schwellen-/Achsabstandsfrequenz**
- **Massenkrafterregung**
Schwingungsanregung durch Unwuchten des drehenden Rades, z.B.
→ **Raddrehfrequenz u. deren Harmonische**

Geschwindigkeitserregung durch Riffeln an Rad und Schiene

Reisezugwagen mit unterschiedlichen Bremsbauarten

Zuggeschwindigkeit: $v = 140 \text{ km/h}$, Riffeltiefe: $\leq 50 \mu\text{m}$

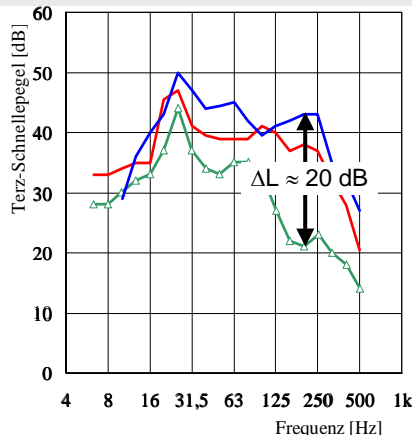


Geschwindigkeitserregung infolge von „Schlupfwellen“



Siehe z.B. auch: Schöch W, Rail Engineering International, Edition 2001 No. 1

Geschwindigkeitserregung infolge von „Schlupfwellen“ - Abhilfe durch Schleifen der Schienenfahrfläche -



Körperschall, gemessen an der Tunnelwand bei Vorbeifahrt des Triebzugs ET 420 mit $v = 60 \text{ km/h}$ auf **Schotteroberbau***)

Vor dem Schleifen:
Schlupfwellen

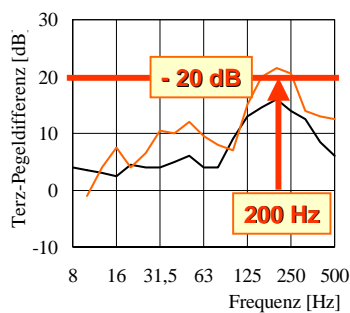
Nach dem Schleifen:
Keine Schlupfwellen

15 Monate nach dem Schleifen:
Wieder ausgeprägte Schlupfwellen

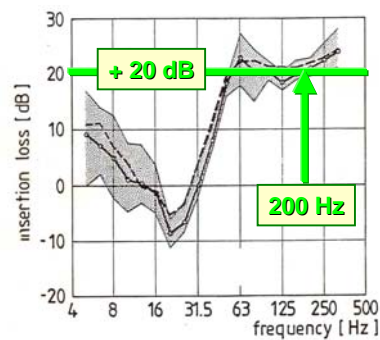
*) Bauart K 54 H mit Unterschottermatten (USM)

Quelle: DB-VersA-Bericht Nr. 55606, März 1987

Einfluss von „Schlupfwellen“ auf den Körperschall

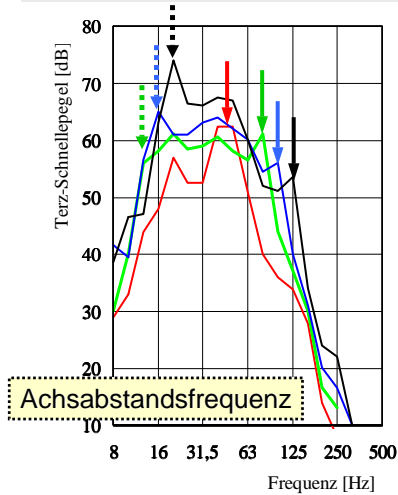


Verschlechterung durch „Schlupfwellen“



Verbesserung durch eine leistungsfähige Minderungsmaßnahme

Parametrische Erregung: geschwindigkeitsabhängig



Körperschall im Boden 8 m seitlich einer oberirdischen Eisenbahnstrecke bei Vorbeifahrt des ICE 1 auf **Schotteroberbau W60 B70**

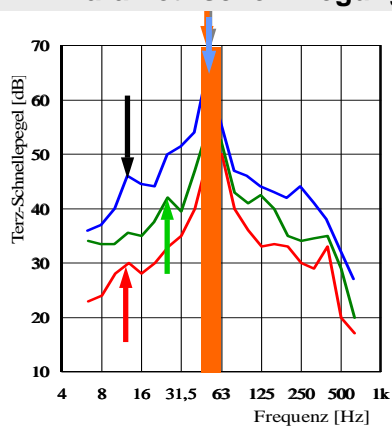
Parameter: Geschwindigkeit v [km/h]

Schwellenabstands-frequenz f_s

$$f_s = \frac{v \text{ [km/h]}}{3,6 \cdot s \text{ [m]}} \quad s \text{ Schwellenabstand bzw. Achsabstand}$$

- 100 km/h ←
- 160 km/h ←
- 200 km/h ←
- 250 km/h ←

Parametrische Erregung und Rad/Schiene-Resonanz



Körperschall an der Tunnelwand bei Vorbeifahrt des Triebzuges ET 420 auf **Schotteroberbau im Tunnel**

Parameter: Geschwindigkeit v [km/h]

Achsabstands-frequenz f_a

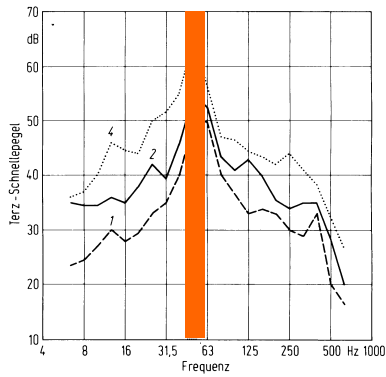
$$f_a = \frac{v \text{ [km/h]}}{3,6 \cdot a \text{ [m]}} \quad a \text{ Achsabstand}$$

- $v = 30 \text{ km/h}$ $f_{s,30} \approx 14 \text{ Hz}$
- $v = 60 \text{ km/h}$ $f_{s,60} \approx 28 \text{ Hz}$
- $v = 120 \text{ km/h}$ $f_{s,120} \approx 56 \text{ Hz}$
- $v = 120 \text{ km/h}$ $f_{a,120} \approx 13 \text{ Hz}$

Rad/Schiene-Resonanzfrequenz
 $f_{RS} \approx 55 \text{ Hz}$

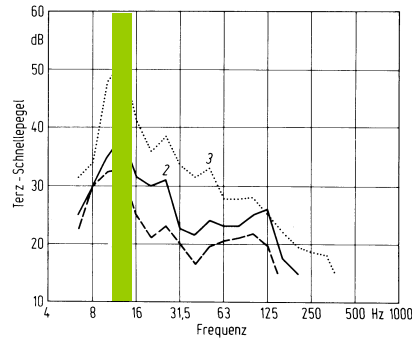
Rad/Schiene-Resonanz bei unterschiedlichem Oberbau

Schotteroberbau



Rad/Schiene-Resonanzfrequenz
 $f_{R/S} \approx 55 \text{ Hz}$

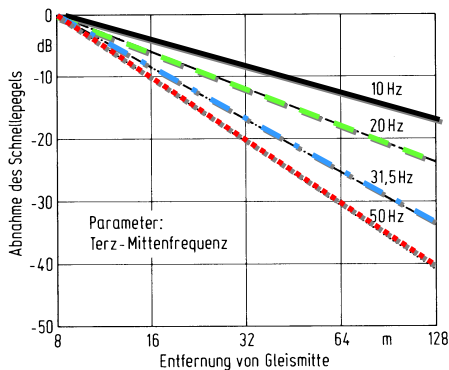
Elastisch gelagerte FF „Masse-Feder-System“



Rad/Schiene-Resonanzfrequenz
 $f_{R/S} \approx 12 \text{ Hz}$

Körperschallausbreitung im Boden

Abnahme des Schnellepegels im Boden seitlich von Bahnstrecken



Mittelwerte über verschiedene Zugarten bei der jeweils typischen Geschwindigkeit; Messungen in mehreren Untersuchungsgebieten,
Normiert auf den 8m-Punkt

$f_m = 10 \text{ Hz}$ $f_m = 20 \text{ Hz}$
 $f_m = 31,5 \text{ Hz}$ $f_m = 50 \text{ Hz}$

Körperschallausbreitung im Boden

- Die Körperschallschnelle im Boden (z-Richtung, 8m-Messpunkt) ist nach einer Pilotstudie in etwa umgekehrt proportional dem Schubmodul G bzw. dem Quadrat der → **Rayleighwellengeschwindigkeit** c_R^2 im Boden am Messort,
- Daraus wurde zur Berücksichtigung der Bodensteifigkeit im Rahmen von Prognosen ein frequenzunabhängiger → **Korrekturfaktor** K_{Boden} abgeleitet:

$$K_{\text{Boden}} = 20 \cdot \log \frac{G_{\text{Messort}}}{G_{\text{Prognoseort}}} = 40 \cdot \log \frac{c_{R,\text{Messort}}}{c_{R,\text{Prognoseort}}}$$

- Die → **Rayleighwellengeschwindigkeit** am Messort und am Prognoseort kann ohne größeren technischen Aufwand durch Messungen ermittelt werden,
- Nicht jedoch die Bestimmung des Einflusses der → **Bodenschichtung**
- Die hierfür notwendigen Parameter können nur mit relativ großem technischen Aufwand (Bohrungen) ermittelt werden.

Literatur: Unveröffentlichter Bericht des PBO, im Auftrag des BZA München der Deutschen Bundesbahn

Körperschallausbreitung im Boden

- Durch Bodenschichtung treten resonanzartige Verstärkungen der Schwingungsamplituden auf, die von der mitschwingenden Masse der Bodenschicht und der Bodensteifigkeit, d.h. dem Schubmodul des Bodens, abhängen.
- Eine Bodenschicht mit der Mächtigkeit H und der Scherwellengeschwindigkeit c_s besitzt eine ausgeprägte → **Grenzfrequenz** f_g [s. *Rücker et al. (1994)*]
- Diese Grenzfrequenz f_g kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$f_g = \frac{c_s}{2 \cdot H}; \quad \text{mit } c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

G Schubmodul des Bodens
 ρ Dichte des Bodens

- Dabei ist H die Schichtdicke an der dünnsten Stelle der Schicht, sie wird daher auch die → **kritische Schichtdicke** genannt,
- Bei Frequenzen unterhalb von f_g findet keine Körperschallausbreitung statt,
- Oberhalb von f_g nähern sich die Amplituden in der Schicht rasch denen des homogenen elastischen Halbraumes an.

Literatur: Rücker W, Said S (1994), Forschungsbericht Nr. 199 der BAM, Berlin, 1994

Körperschallausbreitung - Bodenparameter

- Für eine hinreichende Sicherheit von Prognosen müssen die Ausbreitungsbedingungen in praktischen Anwendungsfällen nach wie vor durch → **Messungen Vorort** ermittelt werden,
- Die Gründe dafür sind u.a.
 - Nicht erkennbare Störungen im Ausbreitungsweg, wie z.B.
 - ✓ Schichtungen im Erdboden,
 - ✓ Felshorizonte,
 - ✓ Moirlinsen u.ä.
 - Nicht quantifizierbare Übertragungsbedingungen infolge von
 - ✓ Stützmauern, Fundamentresten,
 - ✓ Versorgungs- und Entsorgungsleitungen,
 - ✓ Körperschallbrücken u.a.m.
- Verfahren zur Ermittlung von Bodenparametern sind u.a.:
 - Reflexionsseismik
 - Refraktionsseismik, auch → **„Hammerschlagseismik“** genannt

Prinzip der Refraktions- bzw. Hammerschlag-Seismik



Foto: R. G. Wettschureck

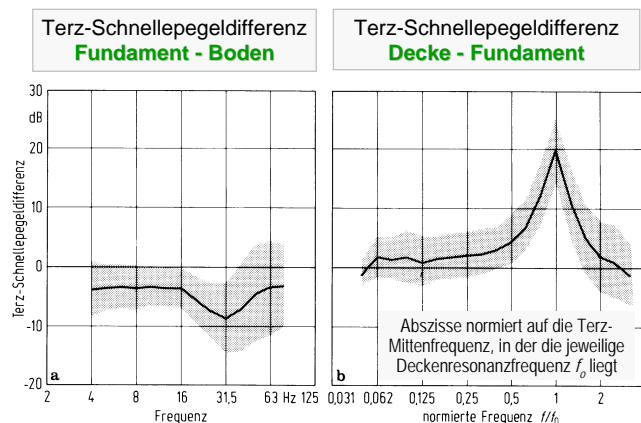
Literatur: Studer A J, Koller M G, „Bodendynamik - Grundlagen, Kennziffern, Probleme“, 2. völlig neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin et al., 1997)

Körperschall in Gebäuden - Einleitung und Ausbreitung

- Die größte Unsicherheit bei Körperschall- bzw. Erschütterungsprognosen ist im → **Bereich der Immission** zu verzeichnen;
- Dies liegt daran, dass nahezu jedes Gebäude auf Erschütterungen aus dem Eisenbahnverkehr unterschiedlich reagiert.
- Die Gründe hierfür sind vielfältig, so ist vor allem von Einfluss:
 - die Bauart und Masse des Fundaments,
 - die Ankopplung des Fundaments an den Erdboden,
 - die Stärke des Mauerwerks,
 - die Dicke und die Konstruktion der Decken,
 - die Spannweite der Decken,
 - die Anzahl der Geschosse und sogar die Möblierung etc.

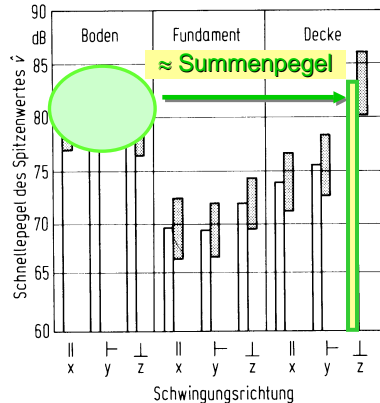
Körperschall in Gebäuden - Einleitung und Ausbreitung.

Mittelwert und Standardabweichung aus Messungen in 135 zwei- und dreigeschossigen Ein- bzw. Mehrfamilienhäusern mit Betondecken.



Körperschall in Gebäuden - Einleitung und Ausbreitung.

Körperschall im Boden vor Gebäuden, in Gebäudefundamenten und auf Decken seitlich von Eisenbahnstrecken mit Mischbetrieb.



Mittlere Schnellepegel mit Standardabweichung aus $25 \leq N \leq 130$ Messwerten, bezogen auf eine Entfernung von 20 m zur Gleisachse.

Schwingungsrichtung:

- x parallel zur Gleisachse (horizontal);
- y senkrecht zur Gleisachse (horizontal);
- z senkrecht zur Erdoberfläche (vertikal)

!! Als Faustregel zu betrachten !!

Beurteilung von Körperschall und Sekundär-Luftschall

- Hinweis auf die derzeitige Situation -

▪ Vorgehensweise bei der Prognose (allgemein)

In der Beratungspraxis werden derzeit im Rahmen von Prognosen
→ **empirische Rechenverfahren** angewandt.

▪ Beurteilung von Körperschall / Erschütterungen

- ✓ Nach wie vor gibt es **keine gesetzliche Regelung** mit Grenzwerten für Erschütterungseinwirkungen aus dem Schienenverkehr
- ✓ Daher wird in der Regel die → **DIN 4150, Teil 2** herangezogen

▪ Beurteilung von Sekundär-Luftschall

- ✓ Auch hier existieren **keine verbindlichen Grenzwerte**
- ✓ Ersatzweise werden die Anhaltswerte folgender Regelwerke angewandt:

⇒ **24. BImSchV** „Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung“

⇒ **VDI 2719** „Schalldämmung von Fenstern mit Zusatzeinrichtungen“

Körperschallschutz-Maßnahmen - Grundlagen - Definitionen -

Körperschalldämmung - Auszug aus „Reallexikon der Akustik“

Körperschalldämmung (auch Körperschallisolation), Verringerung der Körperschallübertragung (Körperschall*) durch teilweise oder vollständige Unterbrechung des Übertragungsweges.

In solchen körperschalldämmenden Anordnungen wird – wenn sie nicht mit einer körperschalldämpfenden Maßnahme kombiniert sind (Körperschalldämpfung*) – keine Energie in Wärme umgewandelt. Die wichtigste körperschalldämmende Maßnahme ist das Einbringen einer weichen Zwischenschicht (vgl. insbesondere Dämmschicht*) in den Körperschallübertragungsweg. Praktische Anwendungsbeispiele sind etwa die elastische Lagerung* von Maschinen, die Verwendung von Fasermatten im Bauwesen (Estrichschwimmender*) etc. Damit weiche Zwischenlagen wirksam sind, muß ihre Federungsimpedanz wesentlich kleiner sein als der Betrag der Impedanz der nachgeschalteten Konstruktion.

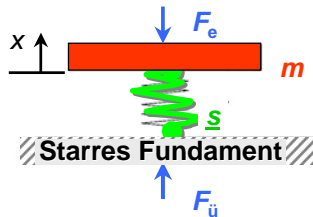
Und der vorgeschalteten Konstruktion \Rightarrow **Impedanz der Quelle !!**

Wirksamkeit von Körperschallschutzmaßnahmen

- Kenngrößen (1) -

1 Abstimmfrequenz f_0 [Hz]: Tiefste vertikale → **Eigenfrequenz** des auf dem Unterbau elastisch abgedeuterten Oberbau-Systems

Erläuterung und Definition am Modell des „Ein-Massen-Schwingers“



F_e erregende Kraft (von außen einwirkend)

m Masse (dynamisch wirksame)

s komplexe Federsteife = $|s| \cdot (1 + j\eta)$

F_u übertragene Kraft (Auflagerkraft)

$$m \cdot \ddot{x} + s \cdot x = F_e(t) \quad (1)$$

$$\text{Lösungsansatz: } x(t) = \hat{x} \cdot e^{j\omega t} \quad (2)$$

$$\text{Aus (2)} \Rightarrow \ddot{x}(t) = (j\omega)^2 \cdot x(t) = -\omega^2 \cdot x(t) \quad \text{Aus (1)} \Rightarrow \text{für } F_e(t) = 0: -\omega_0^2 \cdot m + s = 0$$

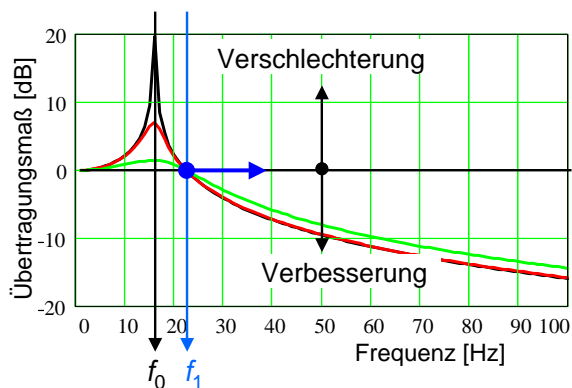
Abstimmfrequenz:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\text{Re}\{s\}}{m}}$$

Eigenfrequenz des Systems

Übertragungsmaß $10 \cdot \lg(F_u/F_e)$ [dB]

Parameter: Verlustfaktor η (Dämpfung)



$$\eta = 1 \cdot 10^{-3}$$

$$\eta = 0,2$$

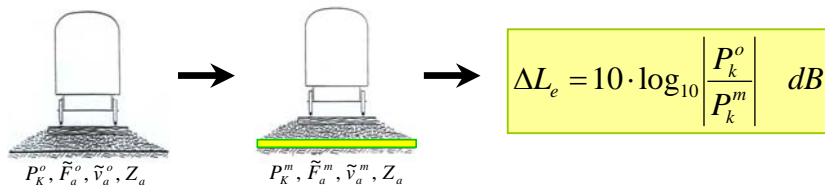
$$\eta = 1,0$$

$$\text{Verbesserung für Frequenzen } f \geq f_1 = \sqrt{2} \cdot f_0$$

Wirksamkeit von Körperschallschutzmaßnahmen - Kenngrößen (2) -

2 Einfügungsdämm-Maß ΔL_e [dB]

- Größe zur Quantifizierung der Verminderung des in die Struktur eingeleiteten Körperschalls infolge der → **Einfügung einer Maßnahme**
- Das → **Einfügungsdämm-Maß ΔL_e** ist als Verhältnis von Körperschall-Leistungen wie folgt definiert:

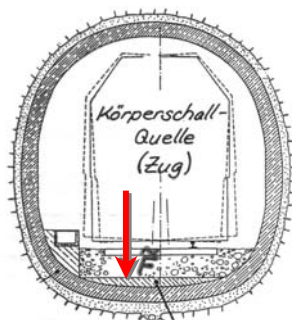


$P_k^{o/m}$: ohne/mit Maßnahme in die Struktur eingespeiste Körperschall-Leistung

Körperschall-Leistung – mittleres Schnellequadrat

Ein Maß für die Körperschall-Leistung in der Struktur ist ⇒ **das mittlere Schnellequadrat**

$$\overline{\tilde{v}}^2 = \frac{\tilde{F}^2 \cdot \text{Re}\{1/Z\}}{\omega \cdot m \cdot \eta}$$



$$\overline{\tilde{v}}^2, \tilde{F}, Z, m, \eta$$

F Effektivwert der anregenden Wechselkraft

Z Eingangsimpedanz der Struktur am
→ **Ort der Kräfteinleitung**

m Masse der Struktur

η Verlustfaktor der Struktur → Dämpfung

ω Kreisfrequenz

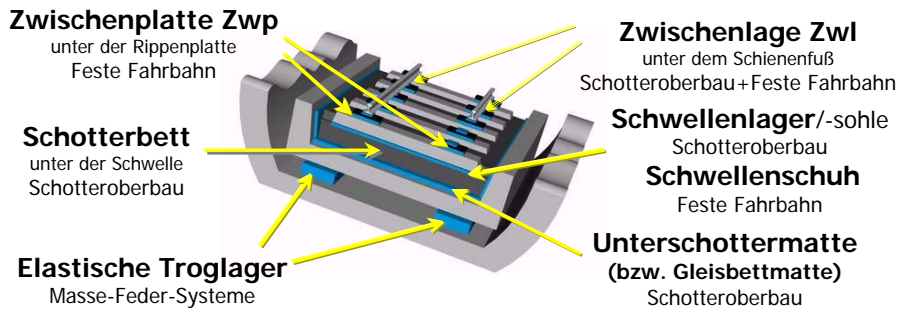
Ziel: Reduzierung von $\overline{\tilde{v}}^2$!!

Körperschall-Schutzmaßnahmen - Allgemeine Prinzipien -

Einbauorte für Körperschallschutz-Maßnahmen

- **KS-Schutzmaßnahmen nahe der Körperschallquelle,**
d.h. am → **Oberbau** oder/und am → **Unterbau** des → **Fahrwegs**
- **KS-Schutzmaßnahmen im Ausbreitungsweg** durch
 - **Schwingungsabsorber** (schwere Betonklötze seitlich d. Gleises)
 - **Dämmung an Impedanzsprüngen** im Ausbreitungsweg durch Schichten hoher spezifischer Masse oder niedriger dynamischer Steife (z.B. schwere Abschirmwände, elastische Erdschlitzte)
 - **Wave impedance blocks (WIBs)**, d.h. Einbau von Betonblöcken unter dem Gleis oder dem Gebäude
- **KS-Schutzmaßnahmen am Gebäude** durch
 - **Elastische Gebäudelagerung (komplett oder ab Kellerdecke)**
 - **Seitliche Abschirmung (im Bereich aufsteigender Kellerwände)**

Typische Positionen der Elastizitäten am Oberbau - Schotteroberbau und Feste Fahrbahn (FF) -



!! Achtung: Maßnahmen nicht an allen Positionen gleichzeitig realisierbar bzw. sinnvoll !!

Bildquelle: <http://www.getzner.com>

Prinzipien der Körperschalldämmung am Oberbau - von der Schiene ausgehend nach unten gesehen -

1 (Hoch)elastische Schienenbefestigungen

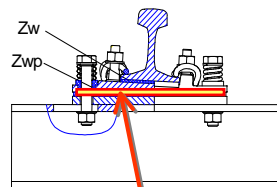


Kontinuierlich elastisches Schienenlager:

„KES“- System ORTEC, hauptsächlich bei Straßenbahnen eingesetzt

(siehe auch http://www.ortec-gmbh.de/deu/produkte_html/frame_produkte.html)

Abstimmfrequenz $f_0 \geq 10 \text{ Hz} (?)$



Einzel-Schienenlager:

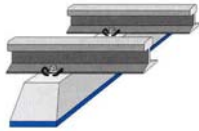
z.B. System „loarg 336“ zur „akustischen Sanierung“ von Stahlbrücken ohne Schotterbett

(siehe auch: http://www.vossloh-fasteningsystems.de/s_cms/de/produkte/system_336/System_336.html)

Abstimmfrequenz $f_0 \geq 25 \text{ Hz}$

Zwischenplatte Zwpl

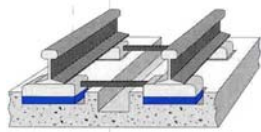
2 Elastische Schwellenlager



Elastische Schwellensohlen:

„Akustische Sanierung“ von Brücken,
insbesondere **„Buckelblechbrücken“**

Abstimmfrequenz $f_0 \geq 25$ Hz



Elastische Schwellenschuhe:

z.B. **System „STEDEF“** bei „SNCF“ oder bei
diversen Straßenbahnen, z.B. Genf, Grenoble

Abstimmfrequenz $f_0 \geq 25$ Hz

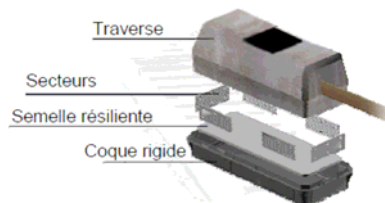
Bildquelle: <http://www.getzner.com>

Buckelblechbrücke (Beispiel) Schotteroberbau ausgebaut



Foto: R. G. Wettschureck

Elastischer Schwellenschuh System „STEDEF“ der SNCF



Bildquelle:
http://www.infobruit.com/reims2007/charles_petit.pdf

3 Elastische Gleisbettmatten → „Unterschottermatten“



Typischer Aufbau mit
Unterschottermatten
und Seitenmatten

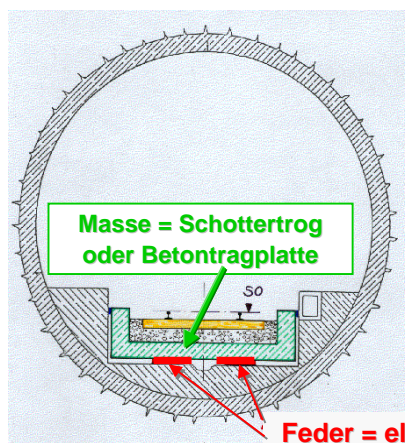
Abstimmfrequenz:
 $f_0 \geq 15 \text{ Hz}$

Seitenmatte

Unterschottermatte

Bildquelle: <http://www.getzner.com>

4 Elastische Lagerung der Gleistragplatte: Schottertrug oder "Feste Fahrbahn" → „Masse-Feder-System“

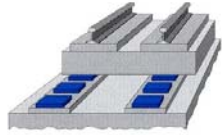


Typischer Aufbau in einem
Tunnel mit zylindrischem
Querschnitt

Abstimmfrequenz:
 $f_0 \geq 5 \text{ Hz}$

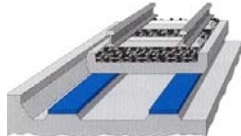
Feder = elastische Lager

Prinzipien der Lagerung bei → **Masse-Feder-Systemen (MFS)**



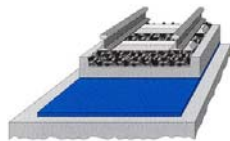
Punktförmige Lagerung:

Bei extrem tiefer Abstimmung Ausführung mit Stahlfedern und „Viscodämpfern“



Streifenförmige Lagerung:

Häufig in Verbindung mit ca. 1 m langen Fertigteiltrögen, siehe U-Bahn München



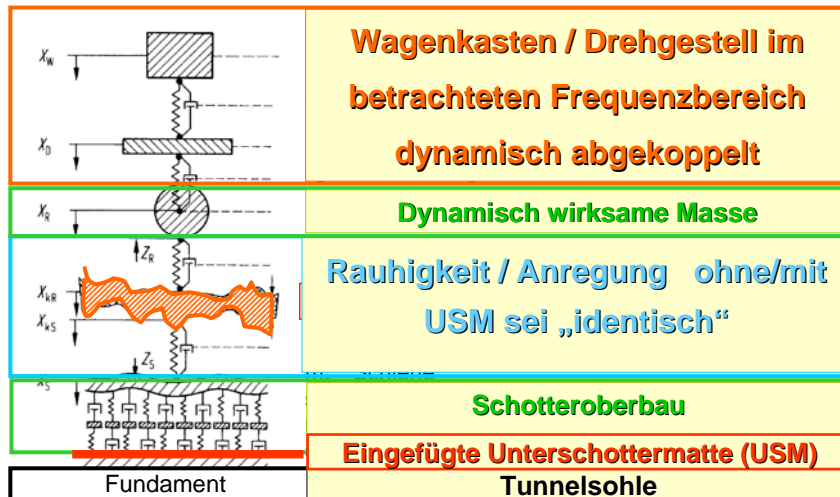
Vollflächige Lagerung:

Als „LMFS“ Einsatz bei Straßenbahnen und auch in Strecken des HGV

Bildquelle: <http://www.getzner.com>

Körperschall-Schutzmaßnahmen - Wirksamkeit - Rechenmodell -

Rad/Schiene-Impedanzmodell mit Rauigkeitsanregung - RIM



Einfügungsdämm-Maß von Unterschottermatten - Rechenmodell

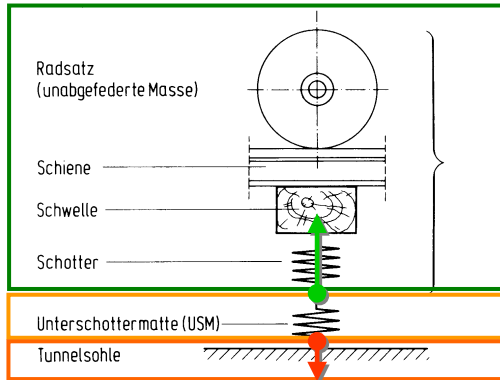
Weitere Voraussetzungen und vereinfachende Annahmen

- Der Ort der einwirkenden Wechselkraft ist quasi konstant
- Das bedeutet, dass die zeitliche Änderung des Anregungsortes bei der Überfahrt des Fahrzeugs unberücksichtigt bleibt
- Diese Vereinfachung ist möglich, da die **Fahrgeschwindigkeit** in der Regel **viel kleiner als die Wellengeschwindigkeit** in den beteiligten Medien ist
- Bei Zügen des HGV auf sehr weichem Untergrund gilt diese Annahme u.U. nicht mehr, siehe → **X2000 auf „soft soil“** an der schwedischen Westküste
- Unterhalb der Schwellen wird eine **ebene Wellenausbreitung** angenommen, die durch die → **Zweitor-Theorie** erfasst wird
- Im Modell nicht eingezeichnete → **Dämpfung** wird mit dem **Verlustfaktor d** durch die Einführung komplexer E-Moduli → $E = |E|(1 + jd)$ berücksichtigt
- Die im Betriebsgleis auch stattfindende **Momentenübertragung** auf den Untergrund (z.B. Tunnelsohle) ist von untergeordneter Bedeutung und kann daher **vernachlässigt** werden

Einfügungsdämm-Maß von Unterschottermatten - Rechenmodell
 [Nach Wettschureck R G und Kurze U J, Acustica 58 (1985)]

Ausgangspunkt: Gleichung für eine elastische Lagerung

$$\Delta L_e = 10 \lg \left| 1 + \frac{1/Z_F}{1/Z_i + 1/Z_a} \right|^2 \text{ dB}$$



„Quell“-Impedanz Z_i

Federimpedanz Z_F

Abschlussimpedanz Z_a

USM-Rechenmodell - Definition der maßgeblichen Impedanzen

1 Federimpedanz der Unterschottermatte Z_F

$$Z_F = \frac{s_M}{j\omega} = \frac{s_M'' \cdot S_W \cdot (1 + j \cdot d_M)}{j\omega}$$

Hierin ist:

- s_M'' die dynamische Steifigkeit der USM (repräsentativer Mittelwert im relevanten Last- und Frequenzbereich)
- d_M der Verlustfaktor des Schwingungssystems mit USM
- S_W die aus dem Lastkegel im Schotterbett zu berechnende Wirkfläche
- ω die Kreisfrequenz
- j die imaginäre Einheit

USM-Rechenmodell - Definition der maßgeblichen Impedanzen

2 Quellimpedanz Z_i

Die Quellimpedanz - bestehend aus den im interessierenden Frequenzbereich dynamisch wirksamen Komponenten des Fahrzeugs und des Schotteroberbaus - ist wie folgt definiert:

$$Z_i \approx \frac{s_s}{j\omega} \left[1 - \left(\frac{\omega_{01}}{\omega} \right)^2 \right]^{-1}$$

s_s komplexe Steife des Schotters
 $\omega_{01} = 2\pi f_{01}$ Resonanzkreisfrequenz

$$f_{01} = \frac{\omega_{01}}{2\pi} = \frac{1,7}{2\pi} \cdot \left(\frac{s_s}{l} \right)^{\frac{3}{8}} \cdot B^{\frac{1}{8}} \cdot m^{-\frac{1}{2}}$$

B Biegesteife der Schiene
 l Bezugslänge
 m dynamisch wirksame Masse

Nach Umformung folgt: $f_{01} = 1,7 \cdot \sqrt[8]{\frac{B}{s_s \cdot l^3}} \cdot \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s_s}{m}} = K(B, s_s, l) \cdot \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s_s}{m}}$

Für übliches Schottergleis (Schienen UIC 60, S 54, S 49) ist: $K(B, s_s, l) \approx 1$

Näherung für die Resonanzfrequenz f_{01} :
 (System mit Schotteroberbau ohne USM)

$$f_{01} \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{s_s}{m}}$$

USM-Rechenmodell - Definition der maßgeblichen Impedanzen

3 Abschlussimpedanz Z_a

- Die Abschlussimpedanz Z_a des Systems ist durch die mechanische Eingangsimpedanz des Untergrundes gegeben;
- Hierbei sind aus schwingungstechnischer Sicht vor allem folgende Fälle zu unterscheiden:

3.1 Eingangsimpedanz von Tunnelsohlen

- Die Impedanz Z_a ist im Vergleich zur Quellimpedanz Z_i groß
- D.h. im Nenner der Gleichung für ΔL_e kann $1/Z_a$ gegenüber $1/Z_i$ vernachlässigt werden.
- Damit erhält man für ΔL_e die bekannte Formel:

$$\Delta L_e = 20 \lg \left| 1 + \frac{s_s / s_M}{1 - (\omega_{01} / \omega)^2} \right| \text{ dB}$$

USM-Rechenmodell - Definition der maßgeblichen Impedanzen

3.2 Planumsimpedanz von oberirdischen Strecken

Das Planum wird als elastischer Halbraum modelliert, dessen Eingangsimpedanz wie folgt berechnet werden kann:

$$Z_a = \frac{s_p}{j\omega} \left(1 - j \cdot \frac{4a}{\lambda_T} \right)^{-1}$$

s_p Federsteife des Planums
 a Radius der Kraftangriffsfläche
 λ_T Schubwellenlänge im Planum

Die Federsteife s_p des Planums errechnet sich zu:

$$s_p = \frac{4 \cdot G \cdot a}{1 - \mu} \approx \frac{4 \cdot E_{v2} \cdot a}{1 - \mu^2}$$

G Schubmodul des Bodens
 μ Poissonzahl des Bodens
 E_{v2} Verformungs-Modul des Bodens
 (nach DIN 18134, Ausgabe Januar 1992)

$$\text{Mit } G = \frac{E_{dyn}}{2(1 + \mu)} \approx \frac{E_{v2}}{1 + \mu}$$

USM-Rechenmodell - Definition der maßgeblichen Impedanzen

3.3 Fahrbahnimpedanz von Brücken

Bei den Brücken sind folgende Konstruktionsarten zu unterscheiden:

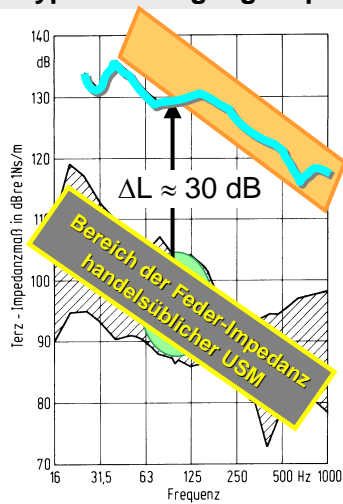
- **Stahlbetonbrücken & Stahlbeton-Verbundbrücken**
 - ✓ Die Betonfahrbahn dieser Brücken hat i.d.R. eine Dicke von ≥ 40 cm;
 - ✓ D.h. die Eingangsimpedanz der Fahrbahnplatte ist von ähnlicher Größenordnung wie die von üblichen Tunnelsohlen;
 - ✓ ΔL_e kann daher nach dem bei Tunnelbauwerken angewandten einfachen Verfahren berechnet werden.
 - ✓ Ein praktisches Beispiel hierzu unter „Körperschall-Schutzmaßnahmen“

- **Stahlbrücken unterschiedlicher Konstruktionsart**

Die Fahrbahnimpedanz Z_a von Stahlbrücken ist um Größenordnungen niedriger als die von Betonbrücken;

- ✓ D.h. sie kann bei der Berechnung von ΔL_e nicht vernachlässigt werden und müsste durch geeignete Modelle rechnerisch ermittelt werden;
- ✓ Dies ist jedoch wegen des **erforderlichen Aufwandes** und der damit verbundenen **Kosten** in der Regel nicht realisierbar.

Typische Eingangsimpedanz verschiedener Unterbauarten



Terz-Impedanzmaße: Betrag der Eingangsimpedanz von Brückenfahrbahnen (Mittelwert gemessene Punktimpedanzen)

Stahlbrücken: Streuband aus Messungen an der Fahrbahn von 10 Brücken unterschiedlicher Bauart

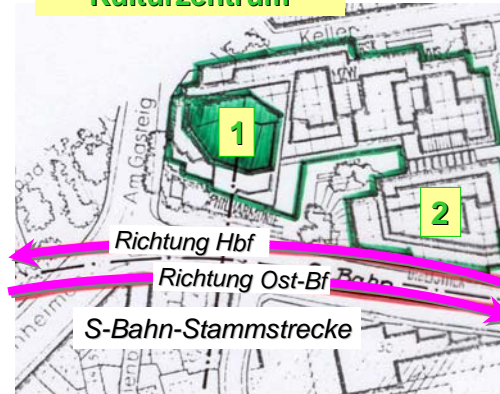
Stahlbeton-Verbundbrücke: Doppel-T-Stahltragwerk mit einer 40 cm dicken Betonfahrbahnplatte

Tunnelbauwerke: Streuband aus Messungen an der Tunnelsohle der 4 typischen Tunnelbauformen

USM-Rechenmodell - Validierung

Einbau von Unterschottermatten (USM) vom Typ B 851 im Münchner S-Bahntunnel, nahe der Philharmonie "Am Gasteig" - Februar 1983

Kulturzentrum



Kulturzentrum "Am Gasteig"

- Vogelperspektive -

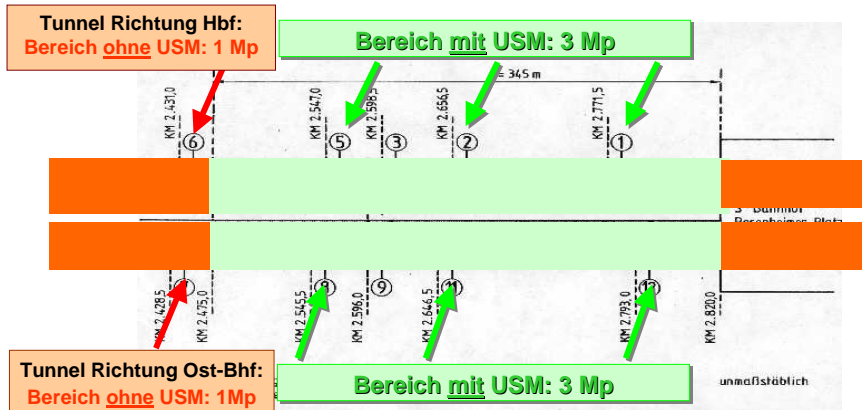
1 Philharmonie

2 Stadtbibliothek

USM-Rechenmodell - Validierung

Körperschallmessungen im im S-Bahntunnel München, 1982 / 1983

Position der Messpunkte Mp an der Tunnelwand



TU Berlin_SS2012: Schienenverkehr_KS

Rüdiger G. Wettschureck

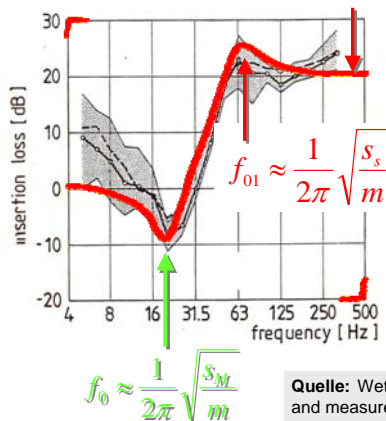
61



USM-Rechenmodell - Validierung

Vergleich gerechnetes mit gemessenem Einfügungsdämm-Maß der USM B851

Für $f \gg f_{01}$ erhält man:
$$\Delta L_e = 20 \lg \left| 1 + \frac{s_s}{s_M} \right| \text{ dB}$$



Ergibt im vorliegenden Fall:

$\Delta L_e(f \gg f_{01}) \approx 20 \text{ dB}$

**Einfügungsdämmmaß einer
Unterschottermatte**

Vergleich Rechnung - Messung

Messung vor/nach Einbau 1982/83

Rechnung vor Einbau 1983

Quelle: Wettschureck RG „Ballast mats in tunnels - analytical model and measurements“, Proc. Inter-Noise 85, München, 1985, 721-724

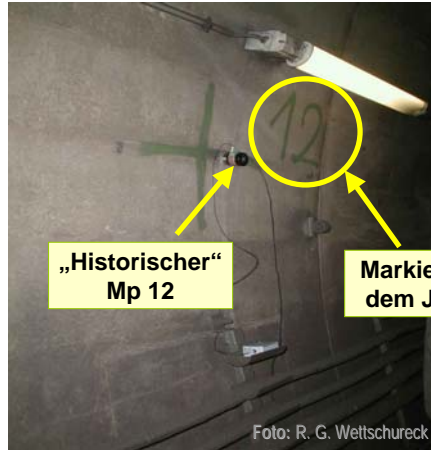
TU Berlin_SS2012: Schienenverkehr_KS

Rüdiger G. Wettschureck

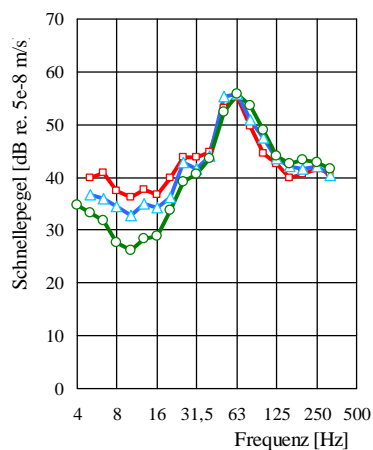
62



Langzeiteigenschaften der USM im Münchner S-Bahntunnel Körperschallmessungen im Juni 2001 an „historischen Messpunkten Mp“



Langzeiteigenschaften der USM im Münchner S-Bahntunnel Körperschallmessungen während Vorbeifahrten von Triebzügen ET 420



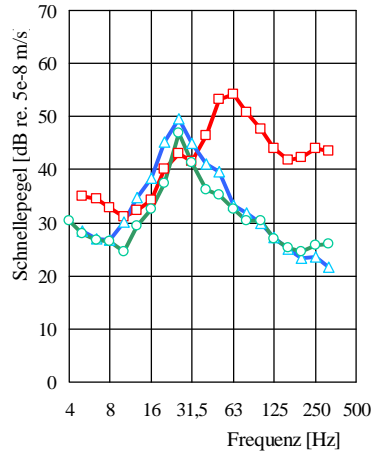
Schnellepegel-Terzspektren im Bereich ohne Unterschottermatten

- 1982: Vor Einbau
- 1983: Nach Einbau
- 2001: 18 Jahre nach Einbau

Quelle: Wettschureck R G et al., Verkehr + Technik 57 (2004), S. 3 – 9

Langzeiteigenschaften der USM im Münchner S-Bahntunnel

Körperschallmessungen während Vorbeifahrten von Triebzügen ET 420



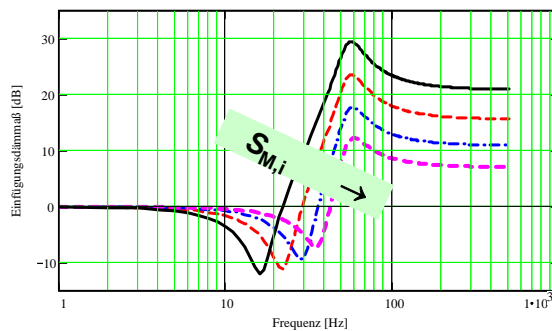
Schnellepegel-Terzspektren im Bereich mit Unterschottermatten

- 1982: Vor Einbau
- 1983: Nach Einbau
- 2001: 18 Jahre nach Einbau

Quelle: Wettschureck R G et al., Verkehr + Technik 57 (2004), S. 3 – 9

Einfügungsdämm-Maß von Unterschottermatten (USM)

Parameter: dynamische Steife der USM $s_{M,i}$ [N/mm³]



$$s_{M,1} = 0,02 \text{ N/mm}^3$$

$$s_{M,2} = 0,04 \text{ N/mm}^3$$

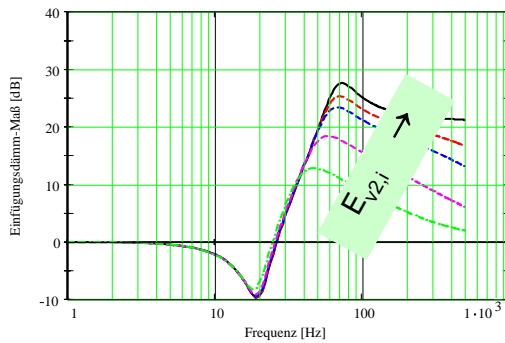
$$s_{M,3} = 0,08 \text{ N/mm}^3$$

$$s_{M,4} = 0,16 \text{ N/mm}^3$$

Quelle: Wettschureck RG „Measures to reduce structure-borne noise emissions induced by above-ground, open railway line“, Rail Engineering International Edition 1997, No. 1, pp. 12 – 16.

Einfügungsdämm-Maß einer Unterschottermatte (USM)

Parameter: Verdichtungsmodul des Planums $E_{v2,i}$ [N/m²] nach DIN 18134



$$E_{v2,5} = 100 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$E_{v2,4} = 100 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$$

$$E_{v2,3} = 500 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

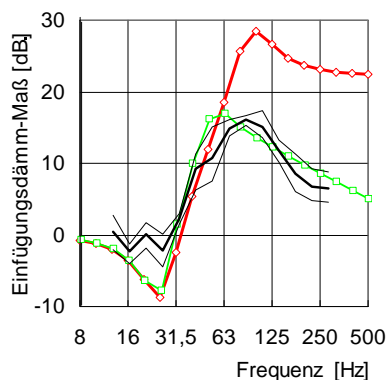
$$E_{v2,2} = 150 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

$$E_{v2,1} = 50 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

Quelle: Wettschureck RG „Measures to reduce structure-borne noise emissions induced by above-ground, open railway line“, Rail Engineering International Edition 1997, No. 1, pp. 12 – 16.

Einfügungsdämm-Maß einer Unterschottermatte (USM)

Vergleich der Einbausituationen Tunnel - Planum



Tunnel, Rechnung: $Z_a \rightarrow \infty$!

Planum, Rechnung: Z_a endlich!

$[E_{v2} \approx 20 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2]$

Messung: obere Streubereichsgrenze

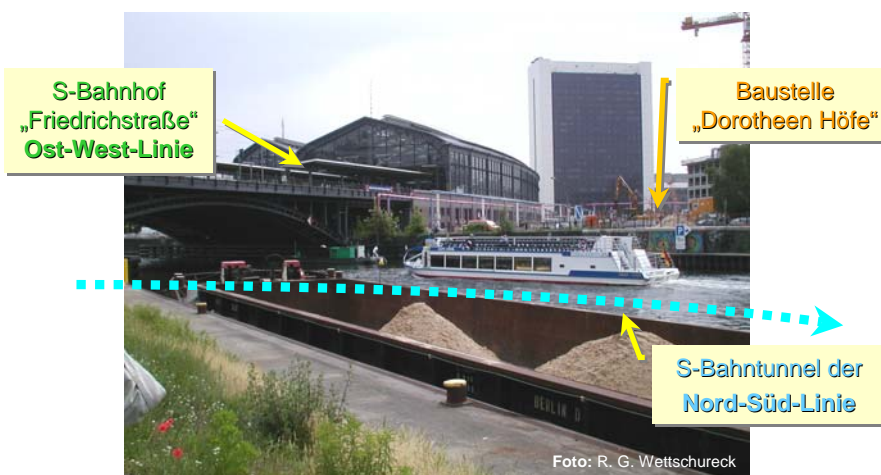
Planum, Messung: Mittelwert

Messung: untere Streubereichsgrenze

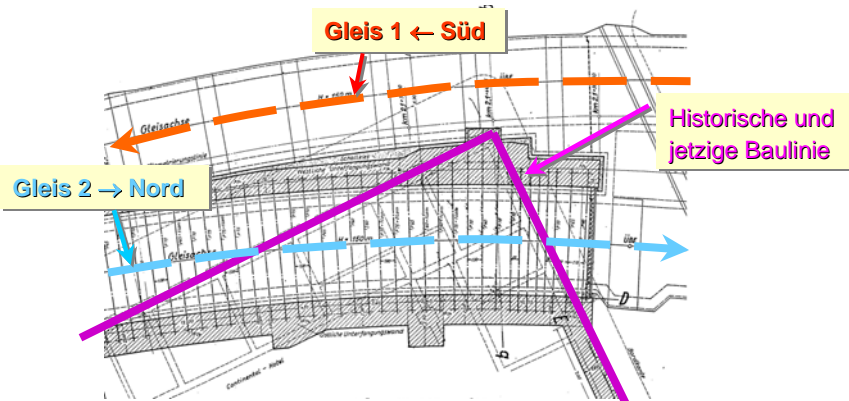
Quelle: Wettschureck RG „Measures to reduce structure-borne noise emissions induced by above-ground, open railway line“, Rail Engineering International Edition 1997, No. 1, pp. 12 – 16.

Körperschall-Schutzmaßnahmen - Ausgeführte Projekte - Wirksamkeit -

Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin

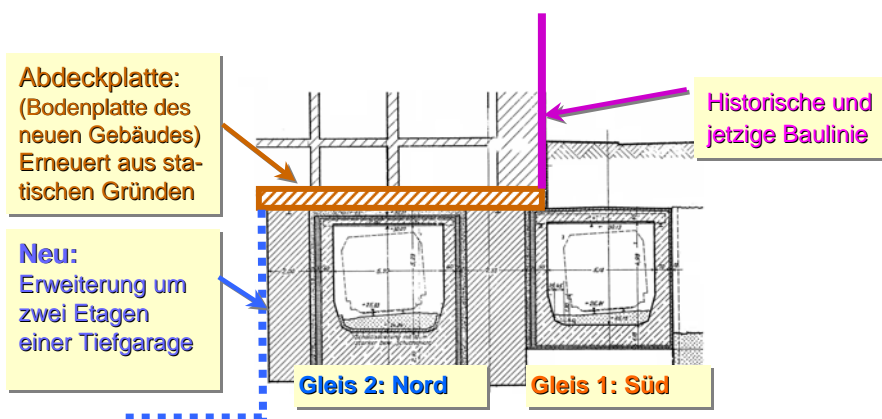


Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin Baustelle „Dorotheen Höfe“ - Draufsicht



Quelle: Wettschureck R G, Daiminger W, Proceedings D-A-CH-Tagung 2001, Innsbruck, 2001, pp. 148–155

Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin Baustelle „Dorotheen Höfe“ - Querschnitt



Quelle: Wettschureck R G, Daiminger W, Proceedings D-A-CH-Tagung 2001, Innsbruck, 2001, pp. 148–155

Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin Weitere Voraussetzungen und Planungsgrundlagen

- Aufgrund des statischen Konzepts der Konstruktion folgte man, dass
→ **Maßnahmen am Gebäude nicht ausreichen würden**
- Wegen der hohen Anforderungen war eigentlich ein → **“schweres”
Masse-Feder-System** erforderlich
- Aus baulichen und betrieblichen Gründen war jedoch ein derartiges
Masse-Feder-System nicht realisierbar
- Daher wurde der Einbau → **hoch wirksamer Unterschottermatten**
vorgesehen
- Deren zu erwartende → **Wirksamkeit** war zu **prognostizieren**
- Durch → **Messungen** vor/nach Einbau wurde die **Wirksamkeit im
Betriebsgleis** ermittelt und mit der prognostizierten verglichen

Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin Beispiel für den Matteneinbau - **Baustelle (1)**



Foto: <http://www.getzner.com>

Auslegen der in Rollen angelieferten Mattenbahnen

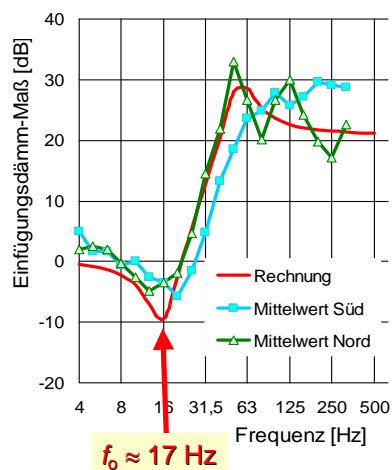
Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin Beispiel für den Matteneinbau - Baustelle (2)



Foto: <http://www.getzner.com>

Verkleben der Mattenbahnen mittels Stufenfalz

Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin

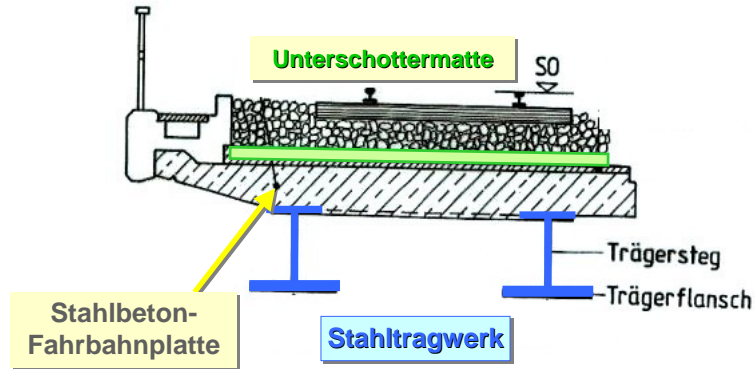


**Berechnetes
Einfügungsdämm-Maß
der Unterschottermatte**
Vergleich mit Messwerten

Quelle: Wettschureck R G, Daiminger W, Proceedings D-A-CH-Tagung 2001, Innsbruck, 2001, pp. 148-155

Stahlbeton-Verbundbrücke in München - Unterschottermatten

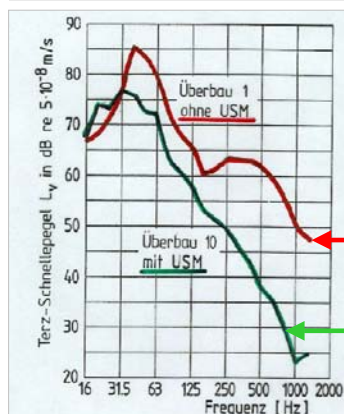
Querschnitt der Randüberbauten der 10-gleisigen Eisenbahnbrücke
Überbau 1: ohne Unterschottermatten (USM) – **Überbau 10: mit USM**



Quelle: Wettschureck R G, Fortschritte der Akustik - DAGA '87, Aachen, 1987, S. 217 - 220

Stahlbeton-Verbundbrücke in München - Unterschottermatten

Ergebnisse der Körperschallmessungen an der Fahrbahnplatte



Schnellepegel-Terzspektrum
 Mittelwerte von fünf Meßpunkten
 bei Überfahrt eines Messzuges
 Typ ET420 mit $v = 100 \text{ km/h}$

**Überbau 1:
ohne Unterschottermatten (USM)**

**Überbau 10:
mit USM, Typ Sylomer D 229**

Quellen: [1] Wettschureck R G, Fortschritte der Akustik - DAGA '87, Aachen, 1987, S. 217 - 220
 [2] Bericht Nr. 35 602 der Versuchsanstalt München der Deutschen Bundesbahn, vom 04.09.1984

Stahlbeton-Verbundbrücke in München - Unterschottermatten

Rechnerische Abschätzung des Einfügungsdämm-Maßes ΔL_e

- Zur Abschätzung von ΔL_e mit Hilfe von Impedanzmaßen verwenden wir die bekannte Formel:

$$\Delta L_e = 10 \lg \left| 1 + \frac{1/Z_{Feder}}{1/Z_{Quelle} + 1/Z_{Fundament}} \right|^2 = 10 \lg \left| 1 + \frac{1/Z_{USM}}{1/Z_i + 1/Z_{Br}} \right|^2 \text{ dB}$$

- Für $Z_{Br} \gg Z_i$ und für positives ΔL_e lässt sich die Gleichung umformen in:

$$\Delta L_e \approx 20 \lg |Z_i| - 20 \lg |Z_{USM}| \text{ dB}$$

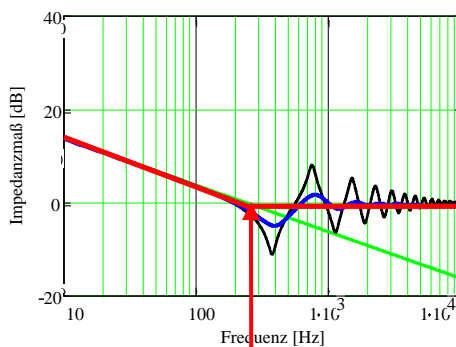
- Die Quellimpedanz Z_i ist für Frequenzen $f < f_0$ durch die Massenimpedanz Z_m
- Und für $f > f_0$ durch die Federimpedanz Z_{Sch} des Schotterbetts bestimmt, wobei

$$f_0 = 1/2\pi \cdot \sqrt{s_s / m}$$

- m = dynamisch wirksame Masse (aus Radsatz plus Oberbauanteilen),
- s_s = dynamische Schottersteife

Stahlbeton-Verbundbrücke in München – Unterschottermatten

Normierte Impedanz einer elastischen Schicht als Feder und als Wellenleiter



$$kd = 1$$

Es ist:

- c_0 Longitudinalwellengeschwindigkeit;
- ρ Materialdichte;
- d Dicke der Federschicht (z.B. Schotter).
- S wirksame Fläche (unter der Schwelle);
- k Wellenzahl $k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$
- λ Longitudinalwellenlänge
- η Verlustfaktor;

— Feder Z_F $\left| \frac{Z_F}{S \cdot \rho \cdot c_0} \right| = \frac{1}{k \cdot d}$

..... Wellenleiter Z_w für $\eta = 0,5$

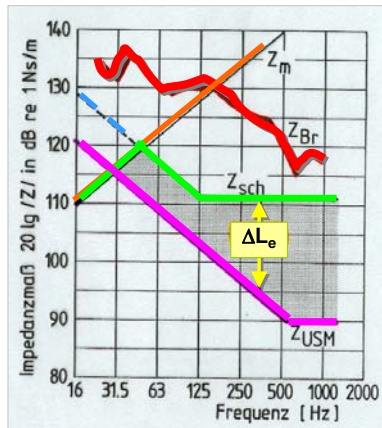
$$\left| \frac{Z_w}{S \cdot \rho \cdot c_0} \right| = \left| j\sqrt{1+j\eta} \right| \cdot \cot \left(\frac{k \cdot d}{\sqrt{1+j \cdot d}} \right)$$

— Wellenleiter (idealisiert)

Quelle: Wettschureck R G, Fortschritte der Akustik - DAGA '87, Aachen, 1987, S. 217 - 220

Stahlbeton-Verbundbrücke in München - Unterschottermatten

Impedanzmaße zur „Abschätzung“ des Einfügungsdämm-Maßes der USM

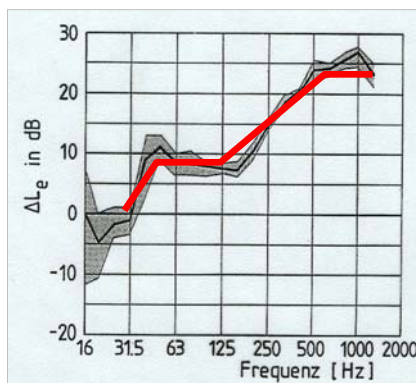


- Z_m Massenimpedanz ($Z_m = \omega m$)
- Z_{Sch} Schotterimpedanz (Wellenleiter)
- Z_i Quellimpedanz
- Z_{Br} Fahrbahnimpedanz (aus Messung)
- Z_{USM} Impedanz der USM (Wellenleiter)
- ΔL_e Einfügungsdämm-Maß der USM

Quelle: Wettschureck R G, Fortschritte der Akustik - DAGA '87, Aachen, 1987, S. 217 - 220

Stahlbeton-Verbundbrücke in München - Unterschottermatten

Vergleich gemessenes und berechnetes Einfügungsdämm-Maß



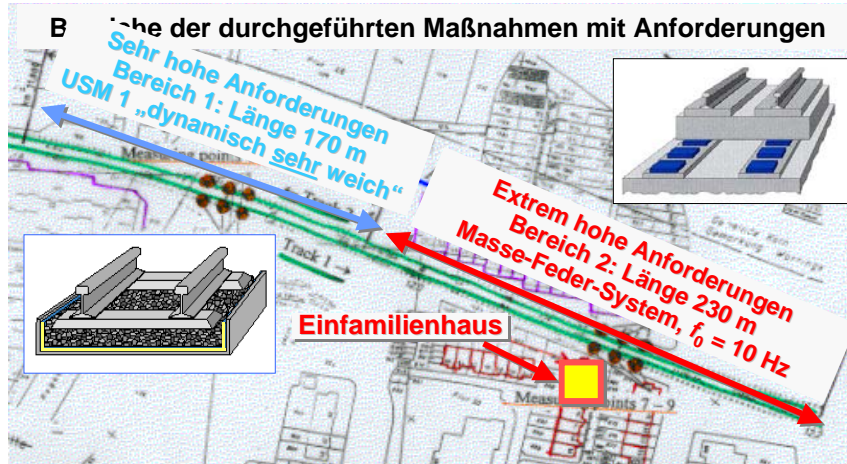
Einfügungsdämm-Maß der untersuchten Unterschottermatte

Messung: Mittelwert und Streubereich (Differenz Überbau 1 – Überbau 10)

Rechnung: Abschätzung aus Impedanzmaßen der Systemelemente

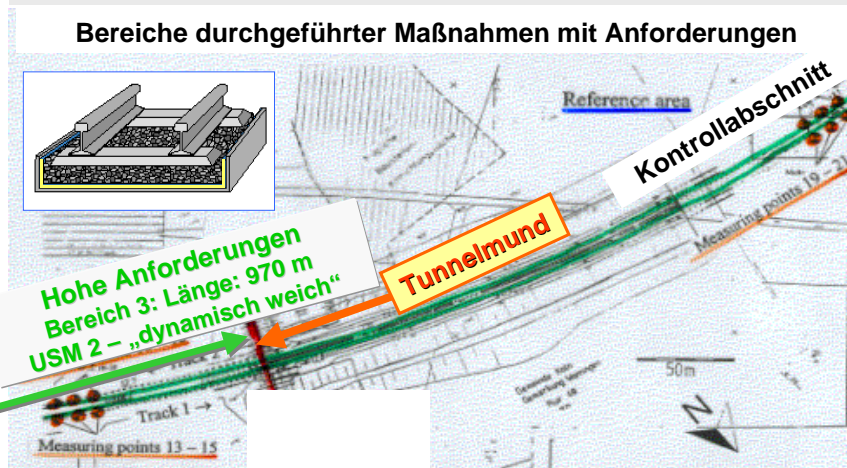
Quellen: [1] Wettschureck R G, Fortschritte der Akustik - DAGA '87, Aachen, 1987, S. 217 – 220
[2] Bericht Nr. 35 602 der Versuchsanstalt München der Deutschen Bundesbahn, vom 04.09.1984

Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel



Quelle: Wettschureck R G et al., Rail Engineering International, Edition 1999, No. 4, pp. 12 – 16

Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel

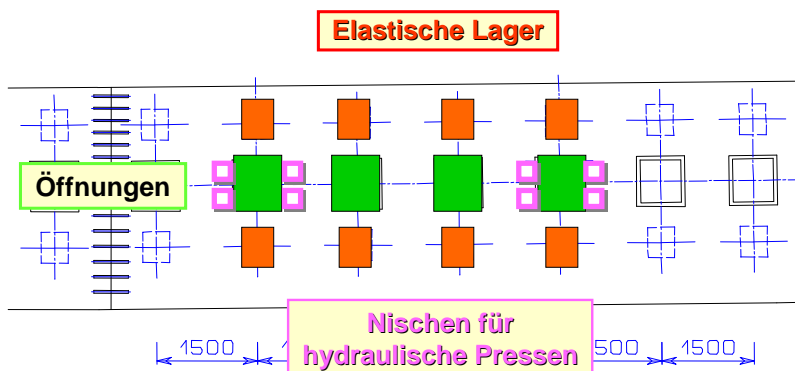


Quelle: Wettschureck R G et al., Rail Engineering International, Edition 1999, No. 4, pp. 12 – 16

Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel

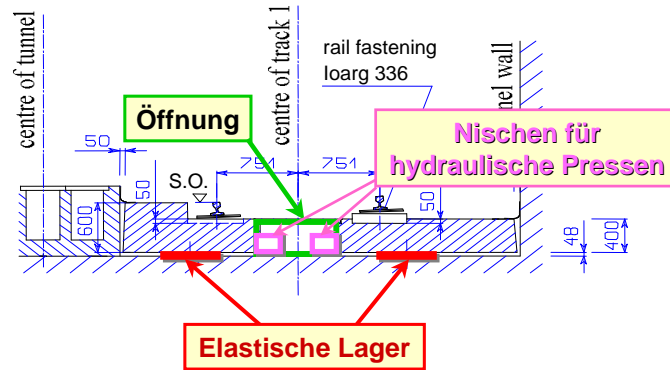


Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel Bereich 2: Masse-Feder-System, Bauart „ZÜBLIN“ - Draufsicht

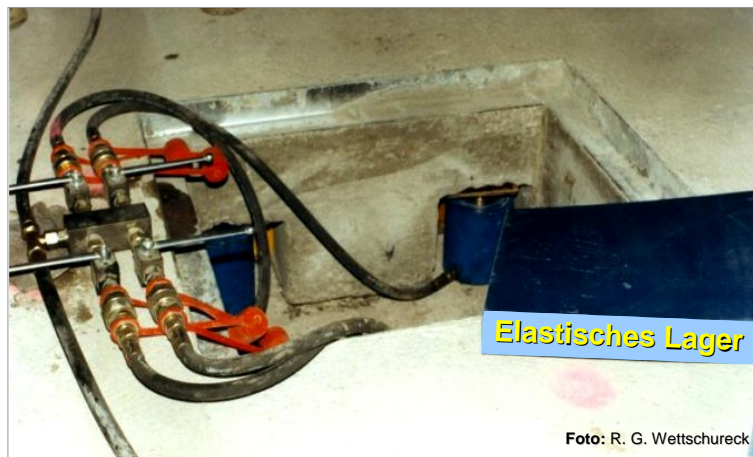


Quelle: Wettschreck R G et al., Rail Engineering International, Edition 1999, No. 4, pp. 12 – 16

Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel
Bereich 2: Masse-Feder-System, Bauart „ZÜBLIN“ - **Querschnitt**



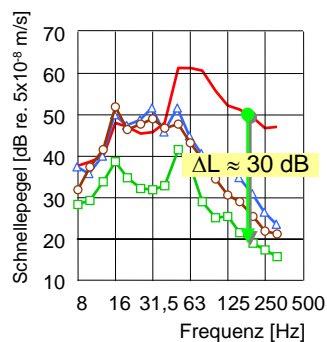
Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel
Masse-Feder-System, Bauart „ZÜBLIN“ - **Einbauöffnung**



Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel Masse-Feder-System, Bauart „ZÜBLIN“ - Bauphase



Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel Vergleich der Wirksamkeit der eingebauten Maßnahmen



Schnellepegel-Terzspektr

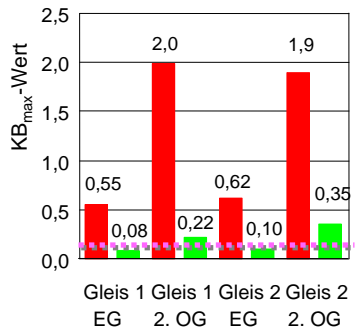
Gemessen an der Tunnelwand vor und nach Einbau der Maßnahmen, Mittelwert Gleis 1 + 2

- Vor Umbau: **Schotteroberbau**
- ▲—▲ Nach Umbau: **USM 2 (Standard)**
- Nach Umbau: **USM 1 („weich“)**
- Nach Umbau: **MFS, $f_0 = 10$ Hz**

Quelle: Wettschureck R G et al., Rail Engineering International, Edition 1999, No. 4, pp. 12 – 16

Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel

Abstimmfrequenz des Masse-Feder-Systems: $f_0 \approx 10$ Hz



Maximale KB-Werte¹⁾ KB_{max}

Gemessen in einem Einfamilienhaus oberhalb des Tunnels **vor/nach** Einbau des Masse-Feder-Systems

■ Vor Einbau ■ Nach Einbau

Fühlbarkeitsschwelle: $KB = 0,1$

¹⁾ Diese Werte entsprechen in etwa den Maximalwerten v_{max} der Schwingschnelle, da die KB-Bewertung erst für Frequenzen unterhalb der Hochpass-Grenzfrequenz des KB-Filters von $f_0 = 5,6$ Hz einsetzt

Quelle: Wettschureck R G et al., Rail Engineering International, Edition 1999, No. 4, pp. 12 – 16

Schlussbemerkungen - Aktuelles

- Die Mechanismen der **Entstehung von Körperschall** im Rad/Schiene-Kontaktpunkt und dessen Ausbreitung im Boden sind weitgehend bekannt;
- Zur **Minderung von Körperschall** und/oder Erschütterungen ist ein **breit gefächertes Instrumentarium** an bewährten Maßnahmen verfügbar,
- Für **Prognosen der Wirksamkeit von Körperschall-Minderungsmaßnahmen** sind vielfach erprobte **Rechenmodelle** in der Anwendung,
- Noch immer gibt es **keine gesetzlichen Regelungen** mit verbindlichen **Grenzwerten für Körperschall-Immissionen** aus dem Schienenverkehr,
- Es existiert - anders als beim Luftschall, z.B. mit der Schall 03 - **kein allgemein gültiges Verfahren zur Prognose** von Körperschall-Immissionen,
- Ursache dafür ist, dass für viele Parameter - ebenfalls anders als beim Luftschall - **keine allgemein gültigen Annahmen möglich** sind,
- In der Beratungspraxis werden derzeit für Prognosen **empirische Rechenverfahren** angewandt.



Stadtcasino Basel

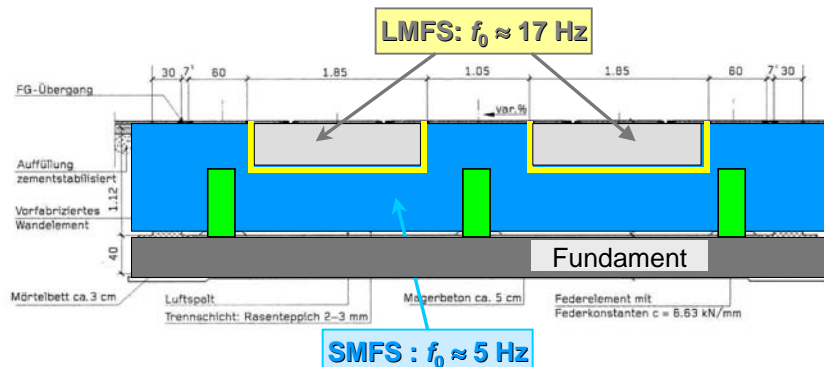
„Schweres MFS“ mit Stahlfedern in Kombination mit einem „Leichten MFS“

- Durch den Straßenbahnbetrieb wurden Musikdarbietungen im historischen Konzertsaal stark beeinträchtigt
- Mit der Gleiserneuerung in 2006 wurde als Abhilfemaßnahme ein „Schweres MFS“ in Kombination mit einem „LMFS“ eingebaut
- Die Abstimmfrequenzen des Systems liegen bei $f_{MFS} \approx 5 \text{ Hz}$ und $f_{LMFS} \approx 17 \text{ Hz}$
- Durch die Maßnahme wurde der Geräuschpegel im Konzertsaal von vorher 46 dB(A) um 22 dB auf ca. 24 dB(A) gemindert

Quelle: "Stadt-Casino Basel" – Sonderheft von TEC21, Fachzeitschrift f. Architektur, Ingenieurwesen u.Umwelt, Beilage zu TEC21 Nr. 19 / 7, Mai 2007, CH-8021 Zürich

Stadtcasino Basel

Querschnitt des kombinierten Systems SMFS + LMFS



Quelle: "Stadt-Casino Basel" – Sonderheft von TEC21, Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt, Beilage zu TEC21 Nr. 19 / 7, Mai 2007, CH-8021 Zürich (s. auch: http://www.gerb.com/de/aktuelles/presse_detail.php?ID=38)

RIVAS - Railway Induced Vibration Abatement Solutions

- Im Jahr 2011 hat die EU im Rahmen des **7. Forschungsrahmenprogramms** unter der Bezeichnung „**RIVAS**“ ein F&E-Projekt gestartet.
- Das bis **2013 laufende Projekt** hat das Ziel, innovative Maßnahmen zu entwickeln, um die negativen Auswirkungen von **Erschütterungen aus dem Eisenbahnverkehr** auf die Umgebung zu **reduzieren** und gleichzeitig die **Wettbewerbsfähigkeit** der Eisenbahnen in Europa zu **wahren**.
- Unter der Leitung des Internat. Eisenbahnverbandes (UIC) arbeiten **26 europäische Partner** aus den Bereichen Eisenbahn-Infrastruktur und -Industrie sowie Forschungsinstitute und Hochschulen in **8 Arbeitspaketen** an der Verwirklichung dieser Ziele.
- Die Projektleitung des Arbeitspaketes „**WP3 - Mitigation measures on track**“ hat die Akustikgruppe T.TVI 32(1) bei DB-Systemtechnik, München.
- **Links zu weiterführenden Informationen:**
 - ✓ **RIVAS-Projekt-Flyer:**
http://www.rivas-project.eu/fileadmin/documents/RIVAS_project_flyer.pdf
 - ✓ **Artikel in „European Railway Review, Vol. 17, Issue 6, 2011“:**
http://www.rivas-project.eu/fileadmin/documents/Press_Corner/Article_EuropeanRailwayReview_Vol.17Issue6_2011.pdf

Quelle: <http://www.rivas-project.eu/>

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr.-Ing. habil. Rüdiger G. Wettschureck
Beratender Ingenieur für Technische Akustik
Gstättstr. 36, D-82439 Großweil
Telefon +49 (8851) 61 46 19
Telefax +49 (8851) 61 46 20

<mailto:post@wettschureck-acoustics.eu>
<http://www.wettschureck-acoustics.eu/>