

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

82439 Großweil, Lkr. Garmisch-Partenkirchen

Telefon +49 (8851) 61 46 19

Telefax +49 (8851) 61 46 20

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 (Hrg), 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
 - Fahrweg - Oberbau → **Schotteroberbau** → **Feste Fahrbahn** - Unterbau
 - Entstehungsmechanismen im Rad/Schiene-Kontaktbereich
 - Körperschallausbreitung im Boden - Körperschalleinleitung in Gebäude
- **Körperschall-Minderungsmaßnahmen**
 - Körperschalldämmung: Grundlagen - Begriffe - Definitionen
 - Allgemeine Prinzipien: Gleis/Oberbau - Ausbreitungsweg - Gebäude
 - Prinzipien im Bereich von: Schiene - Schwelle - Schotter – Gleitragplatte
 - Rad/Schiene-Impedanzmodell → **Rechenmodell** - **Unterschottermatten**
- **Beispiele für die Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen**
 - S-Bahn Berlin, Stadtbahnviadukt: **Elastische Schienenbefestigungen**
 - S-Bahn Berlin, Bhf Friedrichstr. + Potsdamer Platz: **Unterschottermatten**
 - S-Bahn Köln-Chorweiler: **Masse-Feder-System + Unterschottermatten**
- **Schlussbemerkungen** → **aktuelle Projekte & Vorhaben**

Akustische & bahntechnische Grundlagen

- Allgemeines - Begriffe - Definitionen

Körperschall-Schnellepegel

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

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

- Darin bedeuten:
 - v Effektivwert der Schwingschnelle in m/s
 - v_0 Bezugsschnelle = $5 \cdot 10^{-8}$ m/s
- L_v benutzt man zur Kennzeichnung schwingender Strukturen und zur Beschreibung der → **Körperschallübertragung**
- Auch bei der Ermittlung der Wirksamkeit von Minderungsmaßnahmen ist L_v eine charakteristische Größe, siehe → **Einfügungsdämm-Maß**

Körperschall-Beschleunigungspegel

- Messgröße ist meist die → **Schwingbeschleunigung a** , die mit piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern registriert wird, deren Empfindlichkeit an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen ist.
- Der → **Beschleunigungspegel L_a** ist wie folgt definiert:

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

- Darin bedeuten:
 - a Effektivwert der Schwingbeschleunigung in m/s^2
 - a_0 Bezugswert = 10^{-6} m/s^2 (heute allgemein üblich)
 - Gebräuchlich waren früher auch $a_0 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$ bzw. 10^{-4} m/s^2 bzw. $a_0 = 9,81 \text{ m/s}^2$ oder insbesondere auch $a_0 = \pi \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$

Zeigerdarstellung für periodische Vorgänge (1)

- 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:

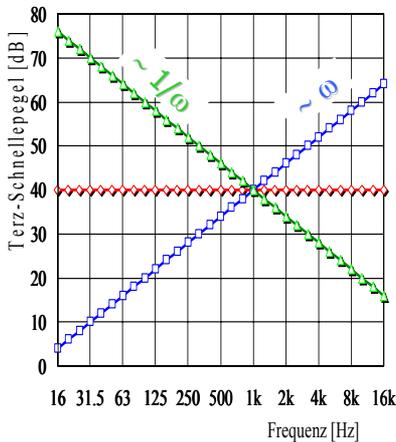
$$|a| = \left| \frac{d}{dt} \left(\hat{v} \cdot e^{j\omega t} \right) \right| = |j\omega \cdot v| = \omega \cdot |v|$$

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

- 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)

Schnelle-/ Beschleunigungs-/ Weg-Pegelspektrum

Bezugsgrößen $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ / $a_0 = \pi \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$ / $x_0 = 8 \cdot 10^{-12} \text{ m}$



Beschleunigungspegel-Spektrum

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

Schnellepegel-Spektrum:
(vergl. „Rosa Rauschen“ im Luftschall)

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

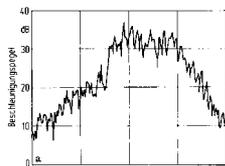
Wegpegel-Spektrum

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

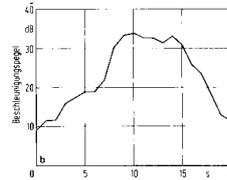
Gleitender Effektivwert - Zeitbewertung

- Bei Messungen an Schienenverkehrsstrecken wird die Messgröße i.d.R. als → **gleitender Effektivwert** registriert
- Das ist die zeitliche Mittelung der Messgröße - wie z.B. der Schwingschnelle v oder der Schwingbeschleunigung a - mit einer exponentiell zeitabhängigen Gewichtung durch eine → **Zeitkonstante τ**
- Diese Art der Mittelung nennt man → **exponentielle Mittelung**
- Folgende Zeitkonstanten sind in der Messtechnik gebräuchlich:**

Zeitbewertung → „FAST“
Zeitkonstante $\tau = 0,125 \text{ s}$



Zeitbewertung → „SLOW“
Zeitkonstante $\tau = 1,0 \text{ s}$



Beschleunigungspegel-Zeitverlauf einer Zugvorbeifahrt

Fahrweg - Oberbau - Unterbau

- Der → **Fahrweg** von Eisenbahnen besteht aus dem → **Unterbau** und dem → **Oberbau**
- Zum → **Unterbau** gehören neben dem Erdplanum und ggfls. einer → „HGT“ - **Hydraulisch gebundene Tragschicht** - auch die „Kunstbauwerke“, wie z.B. Dämme, Brücken und Tunnel
- Als → **Oberbau** bezeichnet man das → **Gleisbett** mit den darauf verlegten Gleisen, Weichen und Kreuzungen
- Das → **Gleis** besteht aus den → **Schienen**, den → **Schwellen** und dem sogenannten → **Kleineisen** zur Befestigung der Schienen an den Schwellen, das sind i.d.R. die → **Schienenbefestigungen**
- Beim Oberbau unterscheidet man hauptsächlich zwischen dem
 - „klassischen“ → **Schotteroberbau** und dem
 - schotterlosen Oberbau, der → **“Festen Fahrbahn” (FF)**

Schotteroberbau – Prinzip + Bauart „W60 B70“

Querschnitt (Prinzipskizze)



Hauptaufgabe der → **Planumsschutzschicht** innerhalb der Gesamtkonstruktion:

- Sicherung einer ausreichenden **Standfestigkeit** und
- Fähigkeit, **Wasser aus der Konstruktion abzuführen**

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

Kennzeichnung der Bauarten von Schotteroberbau

- **Schema der Kennzeichnung: (a) (b) (Zahl) (c)**
 - **(a) Befestigungsart:**
 - ✓ W für Winkelführungsplatte mit Spannklemme,
 - ✓ K bzw. KS für Rippenplatte mit Klemmplatte bzw. Spannklemme
 - **(b) Schientyp:**
 - z.B. 49, 54 bzw. 60 für Schiene S49, S54 bzw. UIC 60
 - **(Zahl) - wird in der Regel weggelassen**
 - üblicherweise 1667**, entsprechend der Anzahl der Schwellen je 1000 m Gleis, entsprechend einem Schwellenabstand von 65 cm
 - **(c) Schwellentyp:**
 - z.B. B58, B70, B90 für verschiedene Betonschwellen und H für Holzschwellen
- **Beispiele typischer Bauarten:**
 - **Bauart K 54 H:** K-Befestigung - Schiene S54 - Holzschwelle
 - **Bauart W 60 B70:** W-Befestigung - Schiene UIC60 - Betonschwelle B70

Quelle: Fiedler J, Grundlagen der Bahntechnik, Werner, Düsseldorf, 1991

Schotteroberbau – Bauart W60 B70



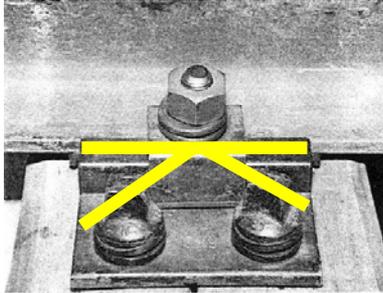
Oberbau W 14 mit Spannklemme Skl 14:

Schienenbefestigungssystem für Betonschwellen.

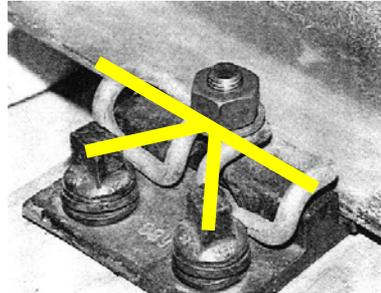
Als Bauart → **W60 B70** mit Betonschwelle B70 und Schiene UIC60 zur Zeit **Standard für Hauptstrecken der DB AG**

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

Schotteroberbau – Bauart „Reichsbahnoberbau K“



Oberbau K mit Klemmplatte,
Rippenplatte, Klemmplatte,
Hakenschraube, Spannring,
Schraubenmutter



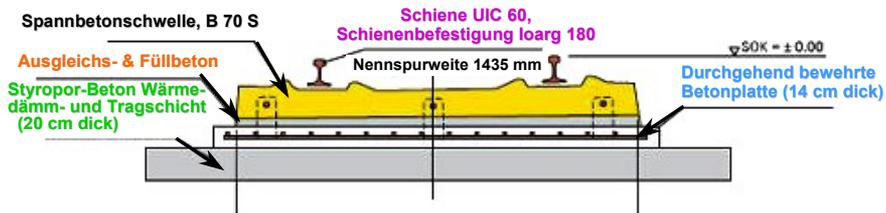
Oberbau KS mit Spannklemme:
Rippenplatte, Spannklemme Skl 12,
Hakenschraube, Unterlegscheibe,
Schraubenmutter

Quelle: Fiedler J, Grundlagen der Bahntechnik, Werner, Düsseldorf, 1991

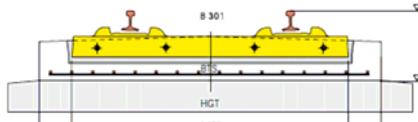
Schotteroberbau – Bauart „W60 B70“



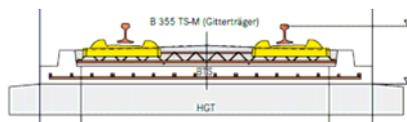
Feste Fahrbahn, Bauart „RHEDA (Classic) → „RHEDA 2000“



„RHEDA (Sengeberg)“

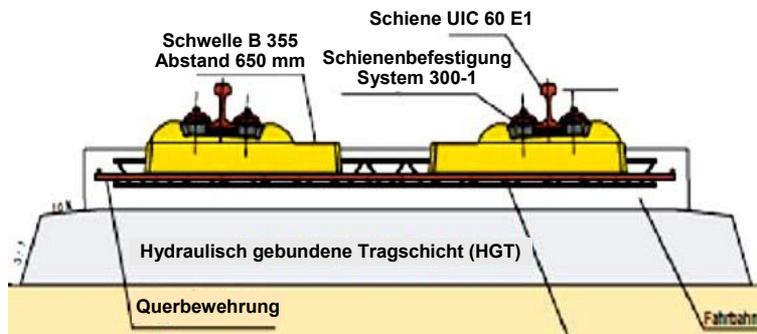


„RHEDA (Berlin HGV-V3)“



Quelle: http://www.railone.com/fileadmin/pfleiderer_track_systems/downloads/Rheda2000_de_01.pdf

Feste Fahrbahn, Bauart „RHEDA 2000“



- Charakteristisch sind der **troglose Aufbau der Betontragplatte**,
- Die Verwendung einer modifizierten **Zweiblockschwelle mit Gitterträger**
- **Monolithische Struktur** der Fahrbahnplatte bei geringer Bauhöhe, dadurch
- Geeignet für Erdbauwerke, Brücken, Tunnels und Weichen¹

Quelle: http://www.railone.com/fileadmin/pfleiderer_track_systems/downloads/Rheda2000_de_01.pdf

Feste Fahrbahn - „System Bögl“ ICE-Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt



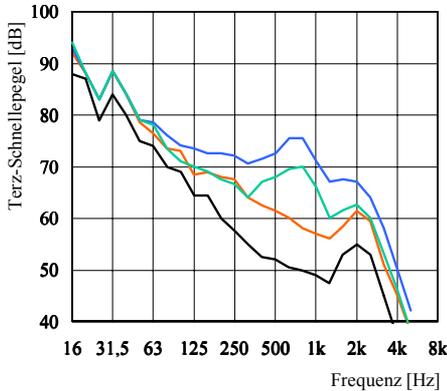
Quelle: <http://www.max-boegl.de/boeglnet/web/show.jsp?nodeId=1000097&lang=de>

Feste Fahrbahn - „System Bögl“ ICE-Neubaustrecke Nürnberg-Ingolstadt



Umfassende Informationen zu Festen Fahrbahnen unterschiedlicher Bauform siehe <http://www.fiebig.de>

Fahrgeräusche - Feste Fahrbahn (FF) - Schotteroberbau



Luftschall in einem Reisezugwagen bei Fahrt auf verschiedenen Oberbauformen mit $v = 200$ km/h

Freie Strecke: Schotteroberbau

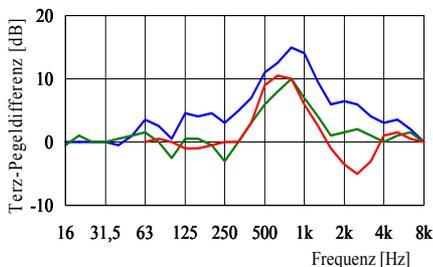
Tunnel: Schotteroberbau

Tunnel: FF, nicht absorbierend

Tunnel: FF, absorbierend

Pegeldifferenz Feste Fahrbahn - Schotteroberbau

Tunnelfahrt bei jeweils gleicher Geschwindigkeit von 160 - 280 km/h

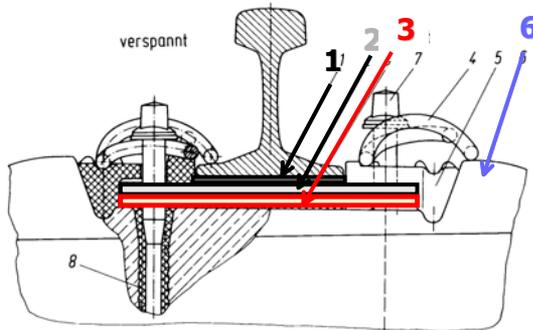


Luftschall im Reisezug: Feste Fahrbahn nicht absorbierend

Luftschall im Reisezug: Feste Fahrbahn absorbierend

Körperschall an der Schiene

Schienenbefestigung - Feste Fahrbahn (FF) - Beispiel



1 Elastische Zwi

2 Grundplatte

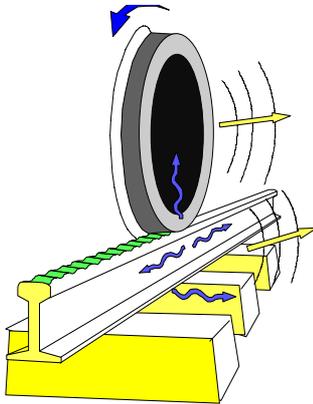
3 Elastische Zwp

6 Betonschwelle

Höhen- und seitenverstellbare Schienenbefestigung
Typ Ioarv 300/DBAG, jetzt Vossloh, System 300

Körperschallentstehung und -Ausbreitung - Allgemeines - Entstehungsmechanismen -

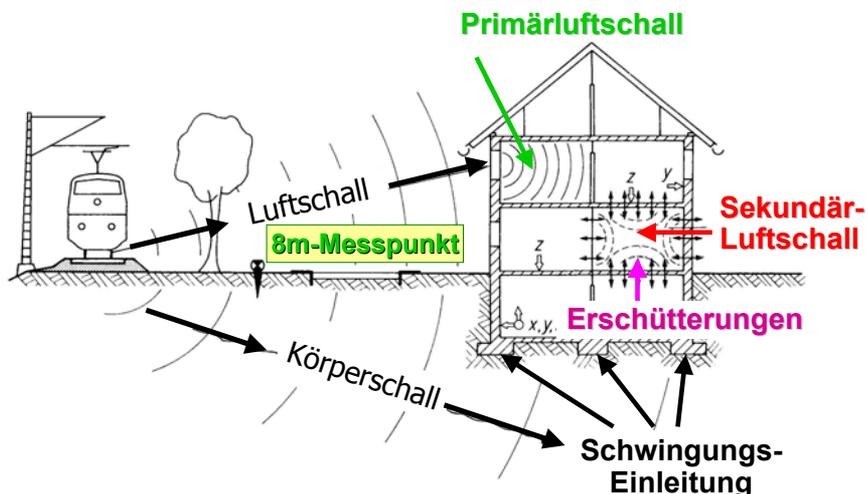
Primär-/Sekundär-Immissionen an Eisenbahnstrecken



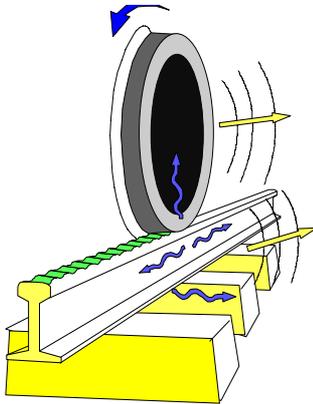
Bildquelle: „TWINS“ - Track
Wheel Interaction Noise Software

- Fahrende Züge erzeugen infolge von Rauigkeiten an Rad-/Schienenlauf­flächen 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 an Eisenbahnstrecken



Entstehungsmechanismen im Rad/Schiene-Kontaktbereich

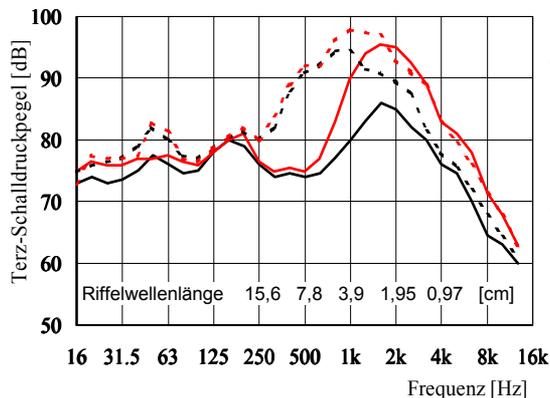


Bildquelle: „TWINS“ - Track
Wheel Interaction Noise Software

- **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 infolge von Schienenriffeln Reisezugwagen mit unterschiedlichen Bremsbauarten

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



Scheibenbremse:

— o. Riffeln 92,5 dB(A)

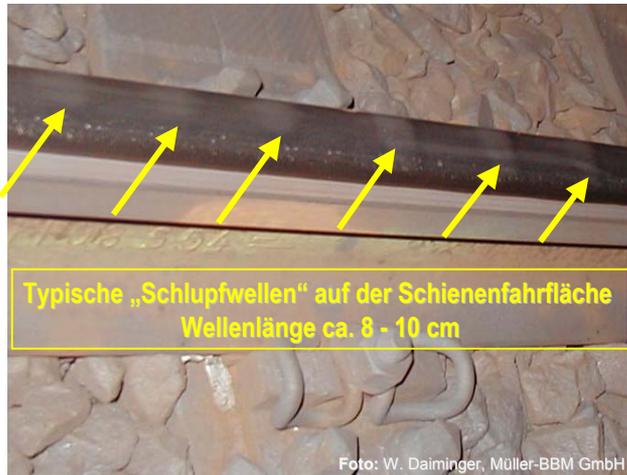
..... m. Riffeln 101 dB(A)

Grauguss-Klotzbremse:

— o. Riffeln 102 dB(A)

..... m. Riffeln 105 dB(A)

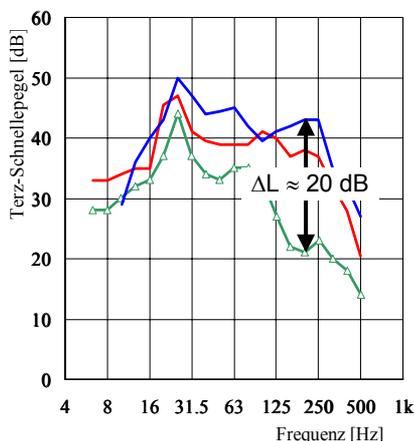
Geschwindigkeitserregung infolge von „Schlupfwellen“



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

Geschwindigkeitserregung durch „Schlupfwellen“

- Abhilfe durch Schleifen der Schienenfahrfläche -



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

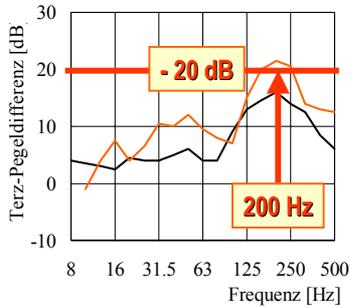
Vor dem Schleifen:
Schlupfwellen

Nach dem Schleifen:
Keine Schlupfwellen

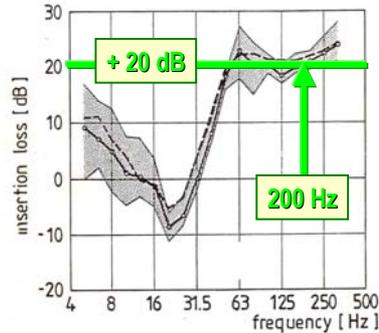
15 Monate nach dem Schleifen:
Wieder ausgeprägte Schlupfwellen

*) Bauart K 54 H mit Unterschottermatten (USM) **Quelle:** DB-VersA-Bericht Nr. 55606, März 1987

Einfluss von „Schlupfwellen“ auf den Körperschall

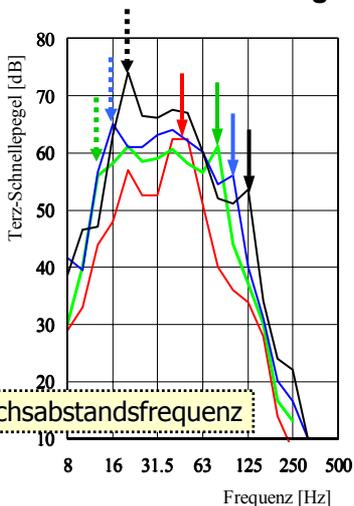


Verschlechterung durch „Schlupfwellen“



Verbesserung durch eine leistungsfähige Minderungsmaßnahme

Parametrische Erregung: geschwindigkeitsabhängig



Schwellenabstands[fach]frequenz f_s

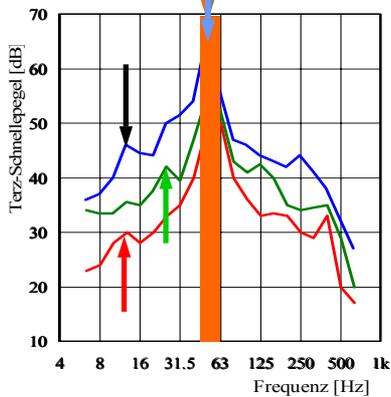
$$f_s = \frac{v [km/h]}{3,6 \cdot s [m]} \quad \begin{matrix} s \text{ Schwellenabstand} \\ \text{bzw. Achsabstand} \end{matrix}$$

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

Parameter: Geschwindigkeit v [km/h]

- 100 km/h ← (red arrow)
- 160 km/h ← (green arrow)
- 200 km/h ← (blue arrow)
- 250 km/h ← (black arrow)

Parametrische Erregung und Rad/Schiene-Resonanz



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

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

Parameter: Geschwindigkeit v [km/h]

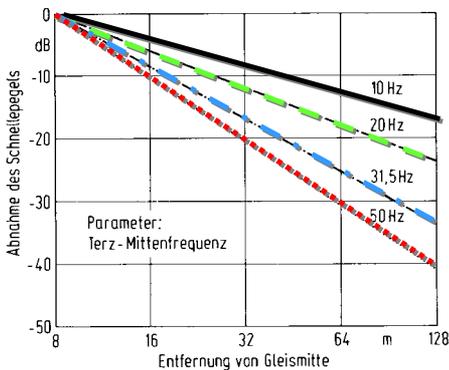
Achsabstandsfrequenz f_a

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

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

Körperschallausbreitung im Boden

Abnahme des Schnellepegels im Erdboden seitlich von Bahnstrecken



Mittelwerte aus Vorbeifahrten verschiedener Zugarten mit den jeweils typischen Zuggeschwindigkeiten, ermittelt 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

- Eine Bodenschicht mit der Mächtigkeit H und der Scherwellengeschwindigkeit v_s besitzt eine ausgeprägte → **Grenzfrequenz f_g** [siehe z.B. *Rücker et al. (1994)*]
- f_g kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$f_g = \frac{v_s}{2 \cdot H}$$

- 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.

Ausbreitungsbedingungen - Bodenparameter

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

Prinzip der Refraktionsseismik bzw. „Hammerschlagseismik“



Foto: R. G. Wettschureck

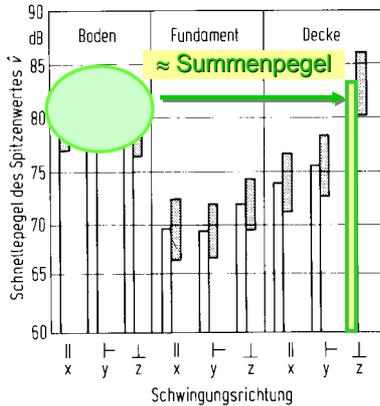
Literatur: Studer A J, Koller M G, „*Bodendynamik - Grundlagen, Kennziffern, Probleme*“, 2. völlig neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin et al., 1997)

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.

Körperschallübertragung in Gebäuden

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

Körperschallschutz-Maßnahmen - Grundlagen - Definitionen -

Körperschalldämmung - Auszug aus „Reallexikon der Akustik“

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

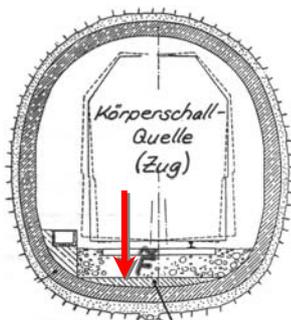
In solchen körperschalldämmenden Anordnungen wird – wenn sie nicht mit einer körperschalldämpfenden Maßnahme kombiniert sind (Körperschalldämpfung*) – keine Energie in Wärme umgewandelt. Die wichtigste körperschalldämmende Maßnahme ist das Einbringen einer weichen Zwischenschicht (vgl. insbesondere Dämmschicht*) 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 !!**

Körperschall-Leistung – mittleres Schnellequadrat

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

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



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

F Effektivwert der anregenden Wechselkraft

Z Eingangsimpedanz der Struktur am \rightarrow **Ort der Krafteinleitung**

m Masse der Struktur

η Verlustfaktor der Struktur \rightarrow Dämpfung

ω Kreisfrequenz

Ziel: Reduzierung von \bar{v}^2 !!

Kenngrößen zur Beschreibung der Wirksamkeit von Körperschallschutzmaßnahmen (1)

1 Abstimmfrequenz f_0 [Hz]

Tiefste vertikale → **Eigenfrequenz des** auf dem Untergrund elastisch abgefederten **Schwingungssystems Fahrzeug/Oberbau**

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}}$$

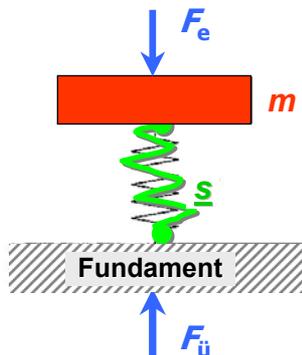
Es bedeuten

s dynamische Federsteife des maßgeblichen Federelementes

m dynamisch wirksame Masse des untersuchten Schwingungssystems

Abstimmfrequenz f_0

- Erläuterung am Beispiel des „Ein-Massen-Schwingers“ -



F_e erregende Kraft (von außen einwirkend)

m Masse (dynamisch wirksame)

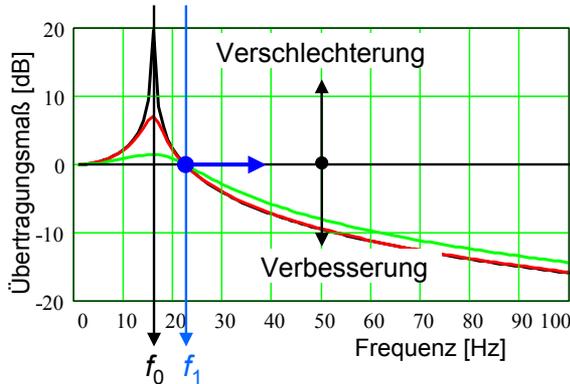
s komplexe Federsteife (des Federelements)

$F_{\ddot{u}}$ übertragene Kraft (Auflagerkraft)

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

Übertragungsmaß $10 \cdot \lg(F_{\ddot{u}}/F_e)$ [dB]

Parameter: Verlustfaktor η (Dämpfung)



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

$$\eta = 0,2$$

$$\eta = 1,0$$

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

Kenngrößen zur Beschreibung der Wirksamkeit von Körperschallschutzmaßnahmen (2)

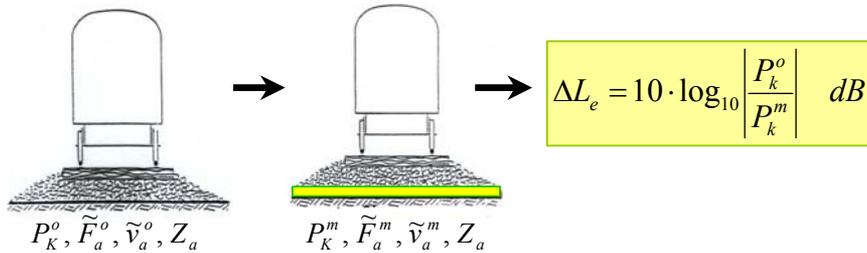
2 Einfügungsdämm-Maß ΔL_e [dB]

- Größe zur Quantifizierung der infolge der → **Einfügung einer Maßnahme** erzielten Verminderung des in die angrenzende Struktur eingeleiteten Körperschalls
- ΔL_e ist definiert als das Verhältnis von Körperschall-Leistungen nach der Beziehung

$$\Delta L_e = 10 \cdot \log_{10} \left| \frac{P_k^o}{P_k^m} \right| \quad \text{dB}$$

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

Definition des Einfügungsdämm-Maßes ΔL_e



$P_k^{o/m}$: Eingespeiste Körperschall-Leistung ohne/mit Maßnahme

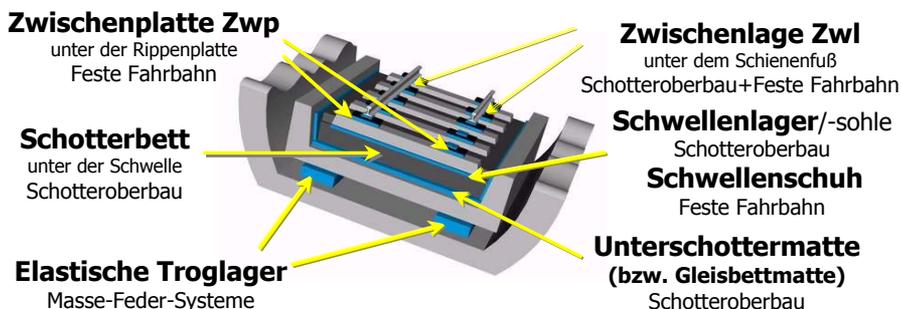
ΔL_e wird durch die Messung der Körperschallpegel L_o und L_m ohne/mit Maßnahme, z.B. an der Tunnelwand, vorzugsweise in → **Terz-Bandbreite** als Funktion der → **Terz-Mittenfrequenz** bestimmt

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 Erdschlitze)
 - **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

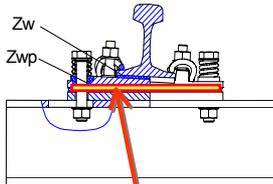


Kontinuierlich elastisches Schienenlager:

„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:

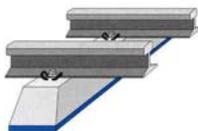
z.B. System „Ioarg 336“ zur „akustischen Sanierung“ von Stahlbrücken ohne Schotterbett

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

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

Zwischenplatte Zwp

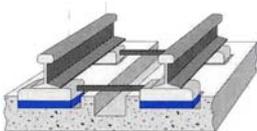
2 Elastische Schwellenlager



Elastische Schwellensohlen:

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

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



Elastische Schwellenschuhe:

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

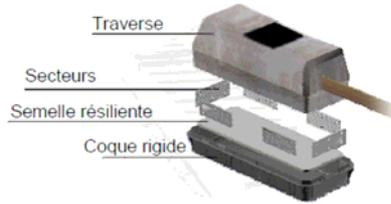
Abstimmfrequenz $f_0 \geq 25 \text{ Hz}$

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

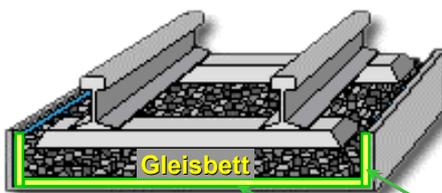
Buckelblechbrücke
z.B. „EBR“ Berlin Spandauer Damm



Elastischer Schwellenschuh
z.B. System „STEDEF“ der SNCF



3 Elastische Gleisbettmatten → „Unterschottermatten“



**Typischer Aufbau mit
Unterschottermatten
und Seitenmatten**

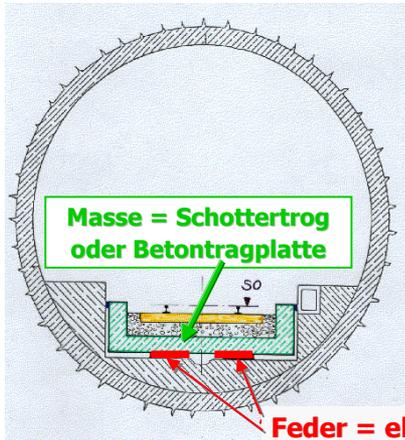
**Abstimmfrequenz:
 $f_0 \geq 15$ Hz**

Seitenmatte

Unterschottermatte

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

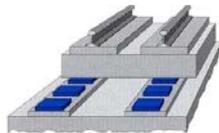
4 Elastische Lagerung der Gleistragplatte: Schottertrog oder "Feste Fahrbahn" → „Masse-Feder-System“ (MFS)



Typischer Aufbau in einem Tunnel mit zylindrischem Querschnitt

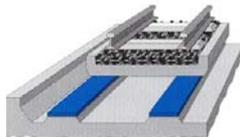
Abstimmfrequenz:
 $f_0 \geq 5 \text{ Hz}$

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



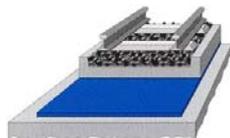
Punktförmige Lagerung:

Bei extrem tiefer Abstimmung Ausführung mit Stahlfedern und „Viscodämpfern“



Streifenförmige Lagerung:

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



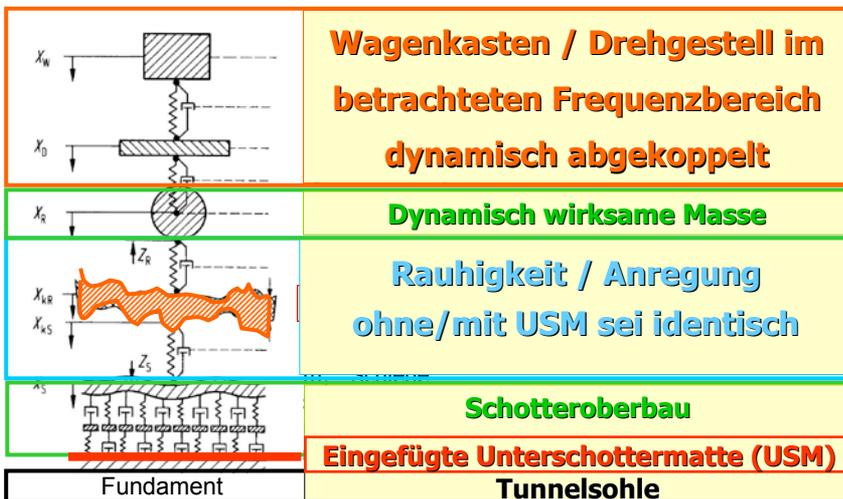
Vollflächige Lagerung:

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 Annahmen (1)

- 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 sehr **viel kleiner ist als die Wellengeschwindigkeit** in den beteiligten Medien
- Bei Hochgeschwindigkeitszügen auf sehr weichem Untergrund ist diese Annahme u.U. nicht mehr zutreffend, siehe z.B. **→ X2000 auf „soft soil“** an der schwedischen Westküste

Einfügungsdämm-Maß von Unterschottermatten - Rechenmodell

Weitere Voraussetzungen und Annahmen (2)

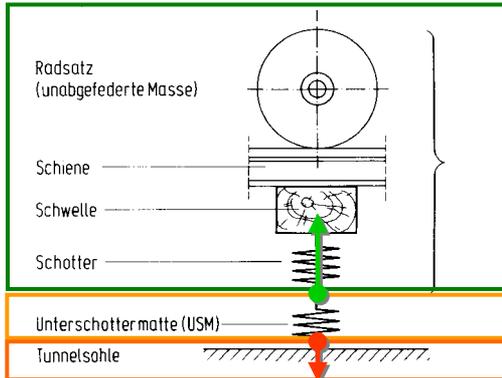
- Unterhalb der Schwellen wird eine **ebene Wellenausbreitung** angenommen, die durch die **→ Zweitor-Theorie** erfasst wird
- Im vereinfachten Modell nicht eingezeichnete **→ Dämpfungen** werden mit dem **Verlustfaktor d** durch Einführung komplexer E-Moduli berücksichtigt **→ $E = |E| (1 + jd)$**
- 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

Definition der maßgeblichen Impedanzen Z

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 Wert 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

2 Quellimpedanz Z_i

Die Impedanz der Quelle - 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)

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

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:

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

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)

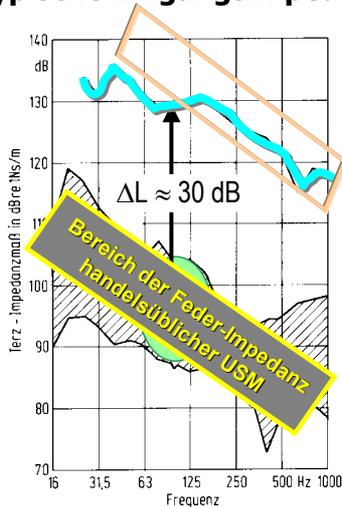
$$\text{Mit } G = \frac{E_{dyn}}{2(1 + \mu)} \approx \frac{E_{v2}}{1 + \mu}$$

3.3 Fahrbahnimpedanz von Brücken

Bei den Brücken ist zu unterscheiden zwischen

- **Stahlbetonbrücken & Stahlbeton-Verbundbrücken**
 - ✓ Die Betonfahrbahn dieser Brückentypen, mit Dicken der Fahrbahnplatte von i.d.R. ≥ 40 cm, hat eine Eingangsimpedanz von ähnlicher Größenordnung wie die von üblichen Tunnelsohlen;
 - ✓ Daher kann zur Berechnung des Einfügungsdämm-Maßes von USM, bzw. generell von Körperschall-Schutzmaßnahmen, in guter Näherung auch das bei Tunnelbauwerken angewandte Verfahren herangezogen werden.
- **Stahlbrücken unterschiedlicher Konstruktionsart**
 - ✓ Die Fahrbahnimpedanz von Stahlbrücken ist um Größenordnungen niedriger als die von Betonbrücken und müsste daher durch geeignete Modelle rechnerisch ermittelt werden;
 - ✓ Dies ist jedoch wegen des erforderlichen \rightarrow **Aufwandes** und der damit verbundenen **Kosten** in der Regel nicht realisierbar.

Typische Eingangsimpedanz verschiedener Unterbauarten



Terz-Impedanzmaße des mittleren Betrages der Eingangs(Punkt)impedanz von Fahrbahnen von Brücken

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

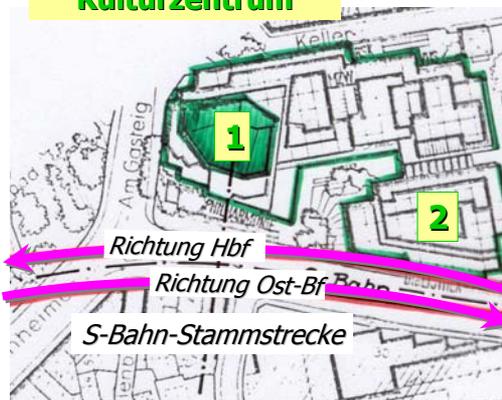
Stahlbeton-Verbundbrücke: Doppel-T-Stahltragwerk mit einer 40 cm dicken Betonfahrbahnplatte

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

Unterschottermatten (USM) im Münchner S-Bahntunnel

Einbau der USM - Februar 1983

Kulturzentrum



Kulturzentrum "Am Gasteig"

- Vogelperspektive -

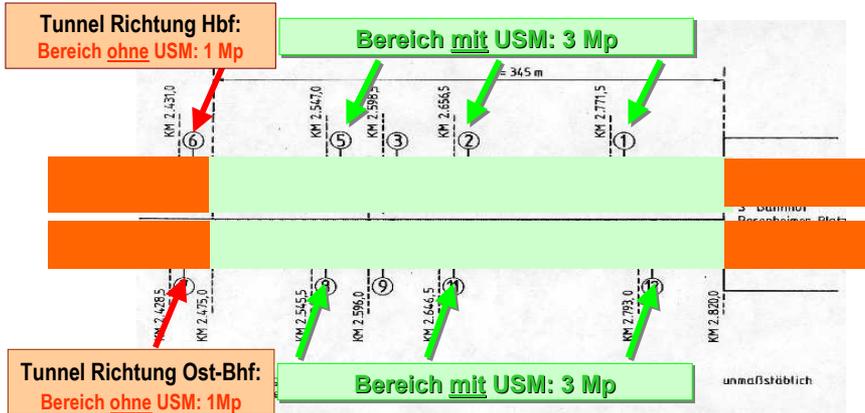
1 Philharmonie

2 Stadtbibliothek

Unterschottermatten im Münchner S-Bahntunnel

Körperschallmessungen im Tunnel: Winter 1982 und Frühjahr 1983

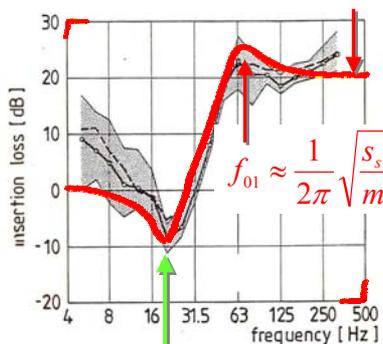
Position der Messpunkte Mp an der Tunnelwand



Einfügungsdämm-Maß von USM - Validierung des Rechenmodells

[USM B 851 im S-Bahntunnel München nahe Philharmonie "Am Gasteig"]

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

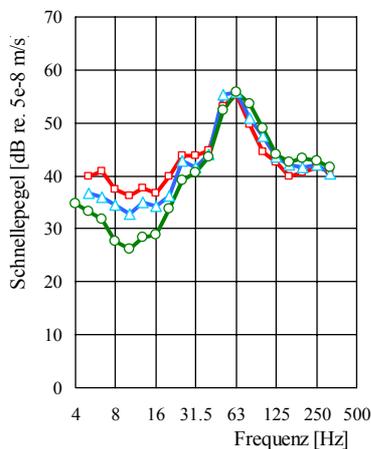
Unterschottermatten im Münchner S-Bahntunnel

Körperschallmessungen im Juni 2001 an „historischen Messpunkten Mp“



Unterschottermatten im Münchner S-Bahntunnel

Körperschallmessungen während Vorbeifahrten von Triebzügen ET 420



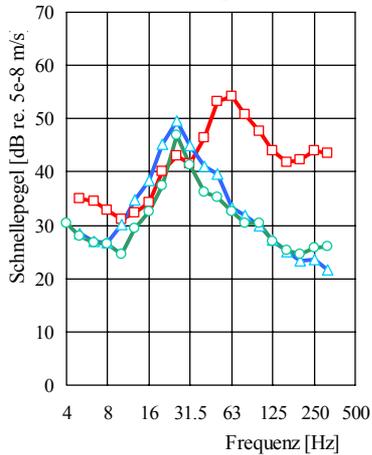
Schnellepegel-Terzspektren im Bereich ohne Unterschottermatten

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

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

Unterschottermatten im Münchner S-Bahntunnel

Körperschallmessungen während Vorbeifahrten von Triebzügen ET 420



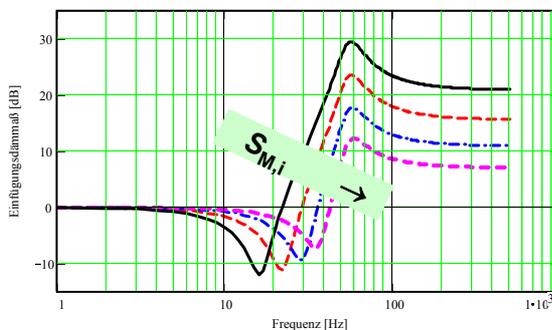
Schnellepegel-Terzspektren im Bereich mit Unterschottermatten

- **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]



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

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

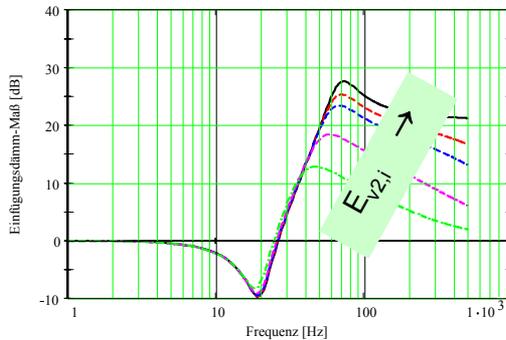
$$s_{M,3} = 0,08 \text{ N/mm}^3$$

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

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



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

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

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

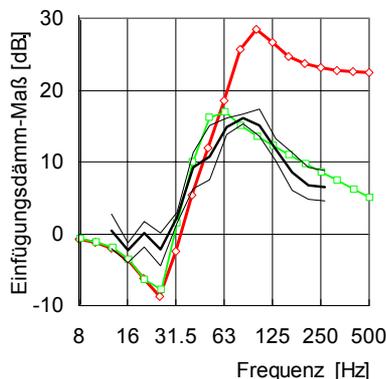
$$E_{v2,2} = 150 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$$

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

Quelle: Wetschureck 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: Wetschureck RG et al. "Reduction of Structure-Borne Noise Emissions from Above-Ground Railway Lines by means of Ballast Mats", Proc. Inter-Noise 97, Budapest, 1997, pp. 577 – 580.

Körperschall-Schutzmaßnahmen

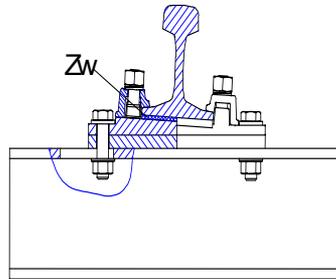
- Ausgeführte Projekte - Wirksamkeit -

S-Bahnviadukt Berlin-Humboldtthafen: Stahlhilfsbrücke Einbau elastischer Schienenbefestigungen



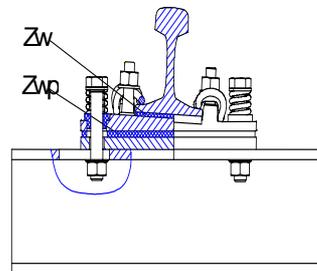
Foto: W. Weißenberger, Müller-BBM GmbH

Zustand vor dem Umbau - "starre" Schienenbefestigung



- Zwischenlage Zw: „sehr steif“
Federziffer: $c_{\text{stat}} \approx 500 \text{ MN/m}$
- **„Starre“ Befestigung, ohne elastische Zwischenplatte ZwP**

Zustand nach dem Umbau - elastische Schienenbefestigung

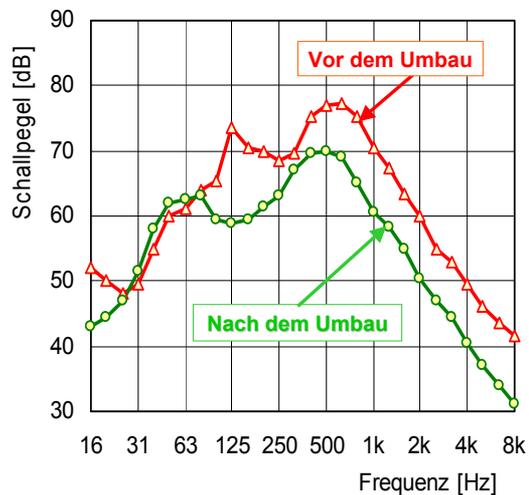


- Zwischenlage Zw: „sehr steif“
Federziffer: $c_{\text{stat}} \approx 500 \text{ MN/m}$
- Zwischenplatte ZwP: **„dynamisch weich“**
Federziffer: $c_{\text{stat}} = 18 \text{ kN/mm}$

Luftschallmessung: Messposition unter der Brücke



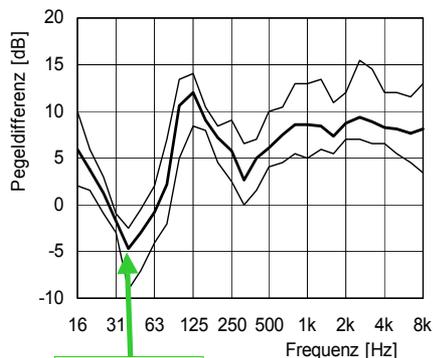
Luftschall unter der Brücke während S-Bahnüberfahrten (ET477)



Luftschallmessung: Messposition vor geöffnetem Fenster



Pegeldifferenz vorher/nachher am Messpunkt unter der Brücke Mittelwert und Streubereich von beiden Gleisen und allen Zugarten



Minderung des A-Schallpegels
vor dem geöffneten Fenster
eines betroffenen Gebäudes:

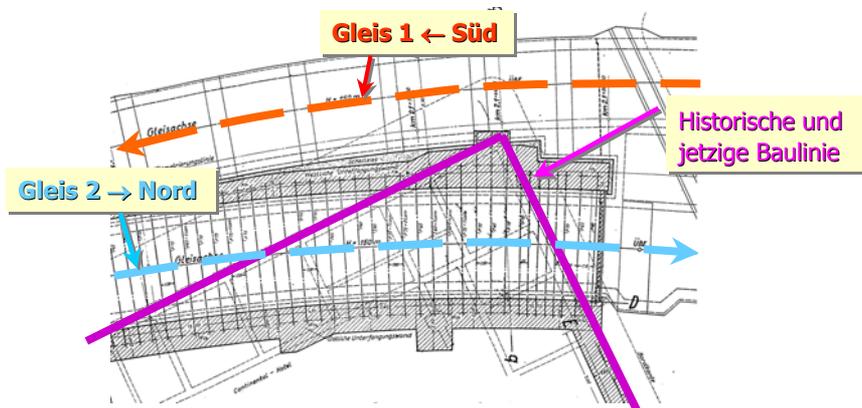
$$\Delta L_A \approx 6 \text{ dB(A)}$$

Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin



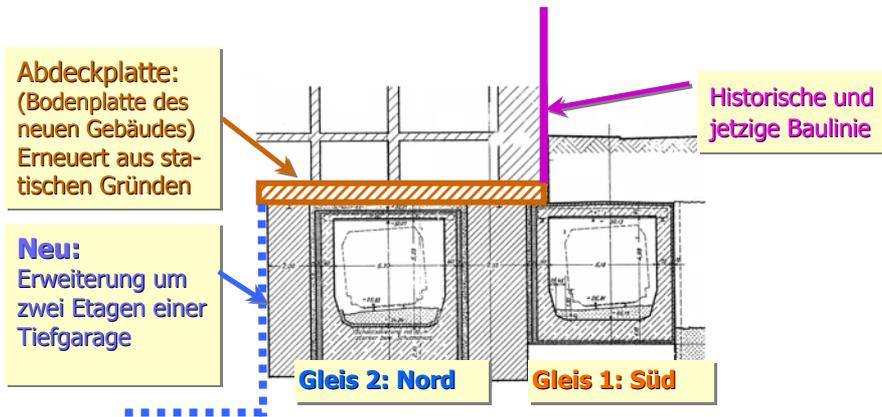
Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin

Baustelle „Dorotheen Höfe“: → Draufsicht



Quelle: Wettschreck 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: Wetschureck 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-Bhf Friedrichstraße Berlin - Baustelle (1)



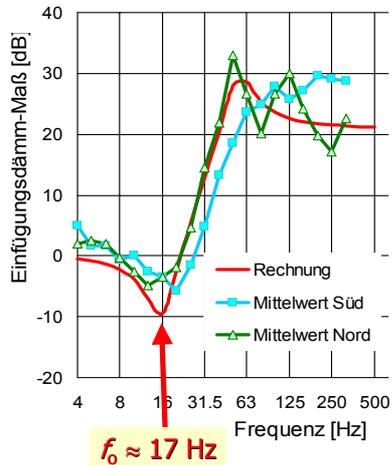
Auslegen der in Rollen angelieferten Mattenbahnen

Unterschottermatten im S-Bhf Friedrichstraße Berlin - Baustelle (2)



Verkleben der Mattenbahnen mittels Stufenfalz

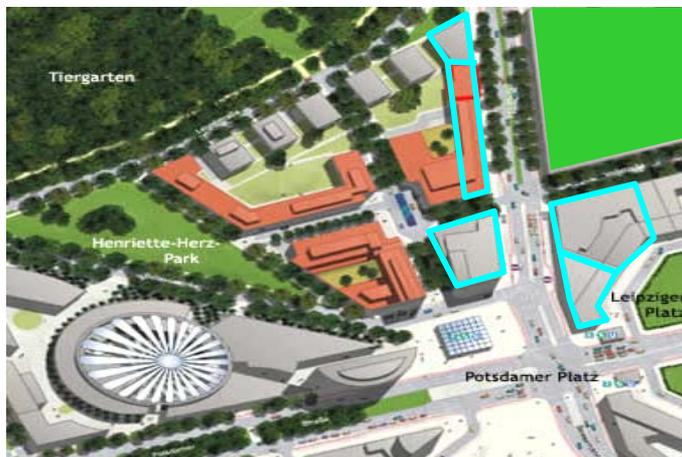
Unterschottermatten im S-Bahnhof Friedrichstraße, Berlin



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

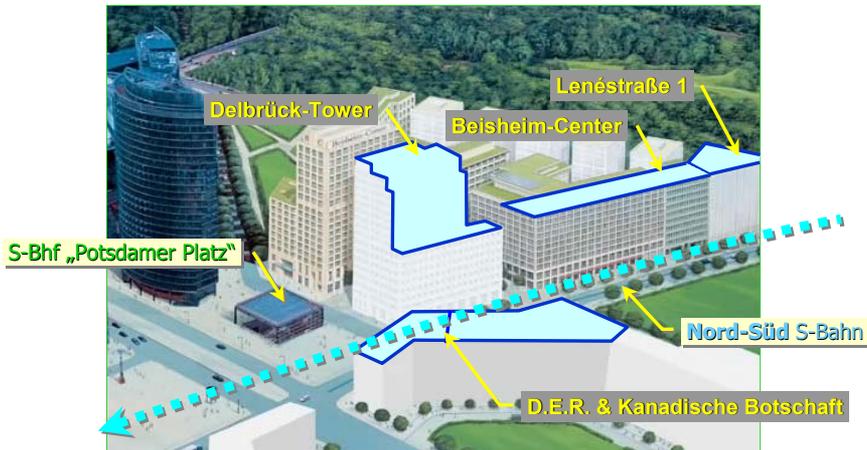
Quelle: Wettschureck R G, Daiminger W, Proceedings D-A-CH-Tagung 2001, Innsbruck, 2001, pp. 148–155

Unterschottermatten im S-Bahnhof Potsdamer Platz, Berlin „Vogelperspektive“ der betroffenen Bauvorhaben



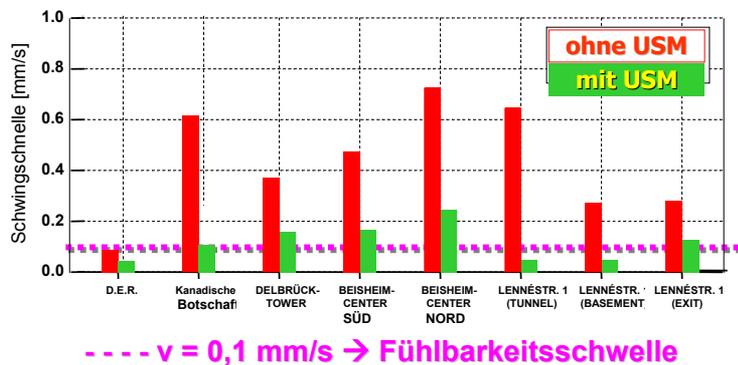
Quelle: Achilles S, Wettschureck R G, Proceedings CFA/DAGA'04, Strassbourg, 2004, Paper 182

Unterschottermatten im S-Bahnhof Potsdamer Platz, Berlin Ansicht der betroffenen Bauvorhaben



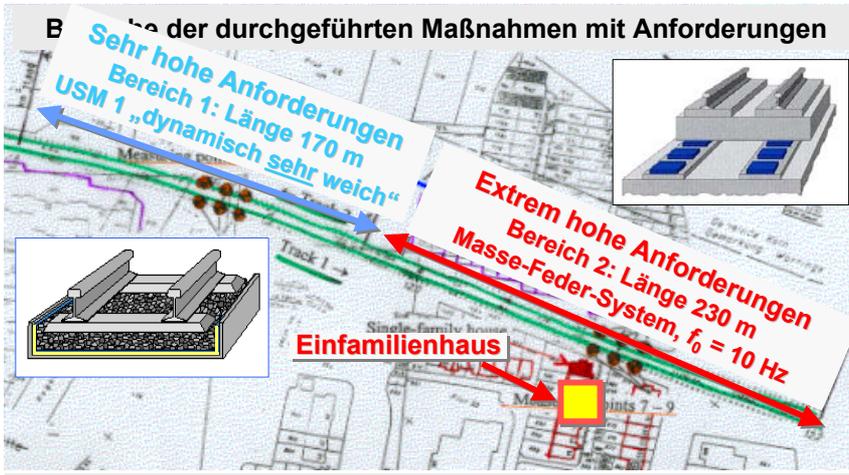
Quelle: Achilles S, Wettschureck R G, Proceedings CFA/DAGA'04, Strassbourg, 2004, Paper 182

Unterschottermatten im S-Bahnhof Potsdamer Platz, Berlin Maximalwerte der Schwingschnelle, vor / nach Einbau der USM



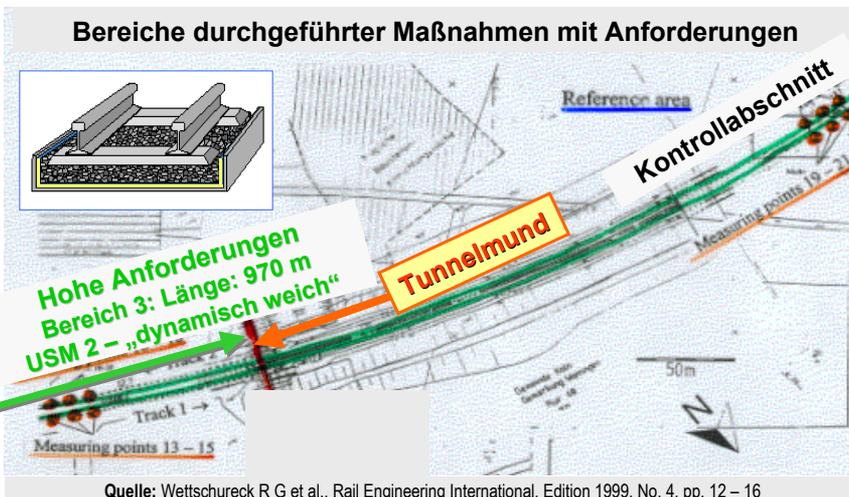
Quelle: Achilles S, Wettschureck R G, Proceedings CFA/DAGA'04, Strassbourg, 2004, Paper 182

Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel



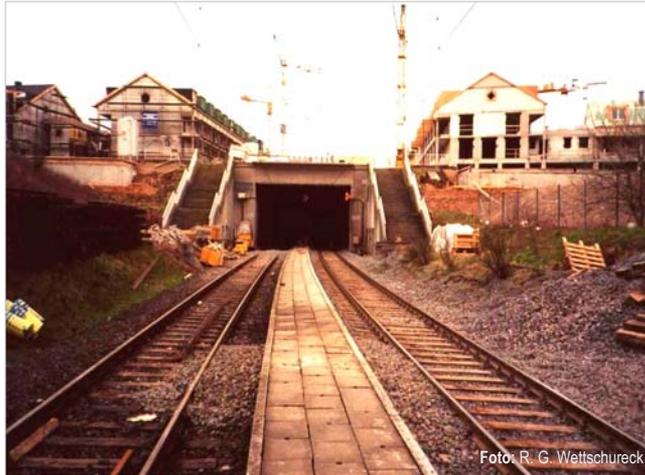
Quelle: Wetschureck R G et al., Rail Engineering International, Edition 1999, No. 4, pp. 12 – 16

Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel

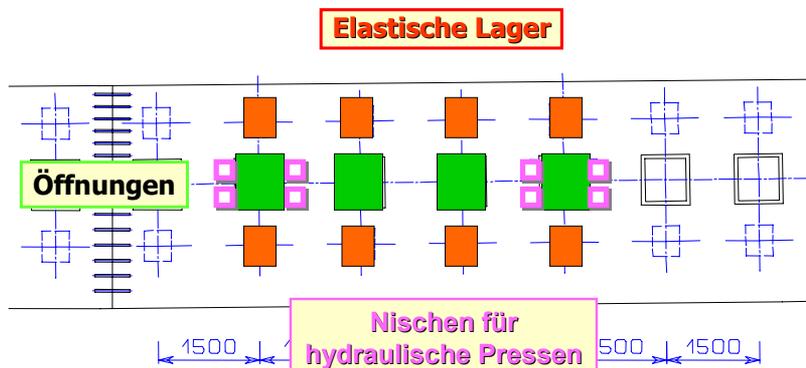


Quelle: Wetschureck R G et al., Rail Engineering International, Edition 1999, No. 4, pp. 12 – 16

Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel

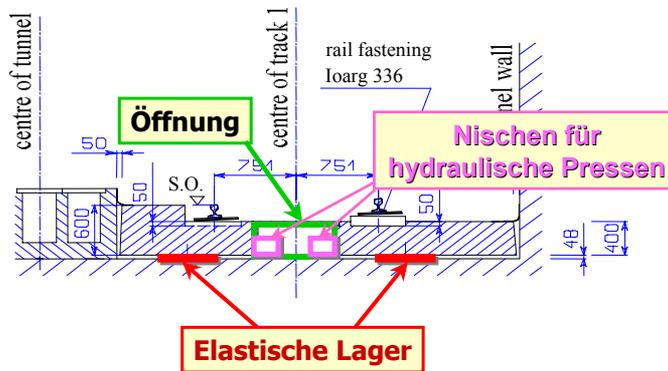


Körperschall-Schutzmaßnahmen in einem Kölner S-Bahntunnel Bereich 2: Masse-Feder-System, Bauart „ZÜBLIN“ - Draufsicht



Quelle: Wettschureck 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



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

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

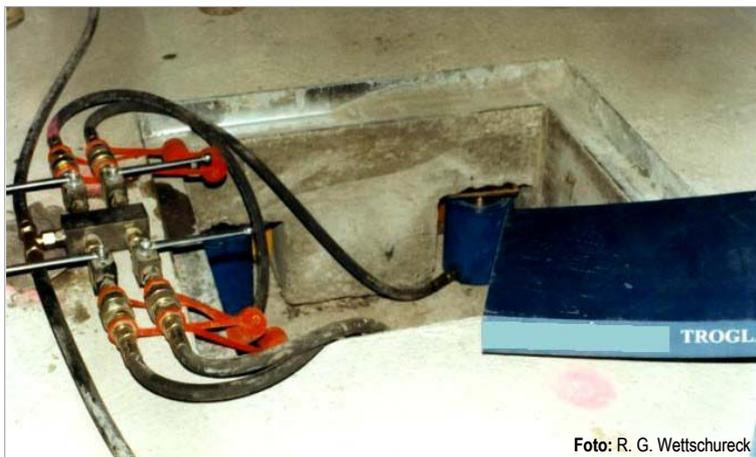
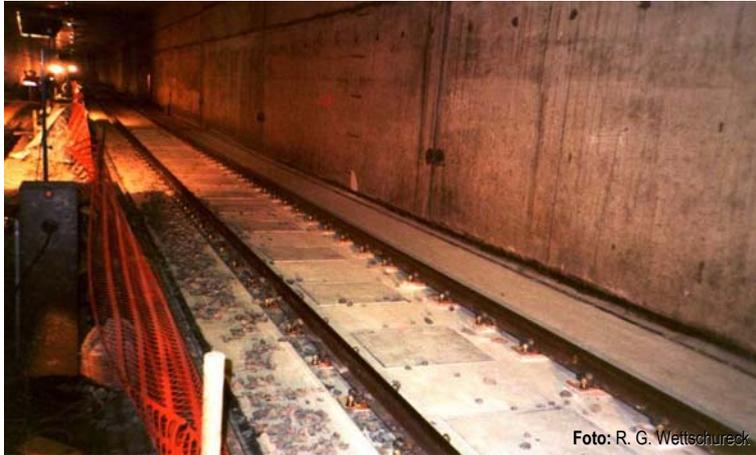
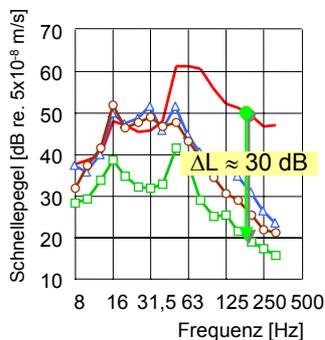


Foto: R. G. Wettschureck

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



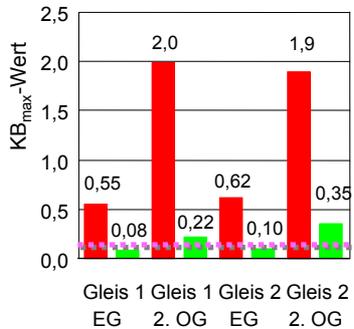
Schnellepegel-Terzspektren

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

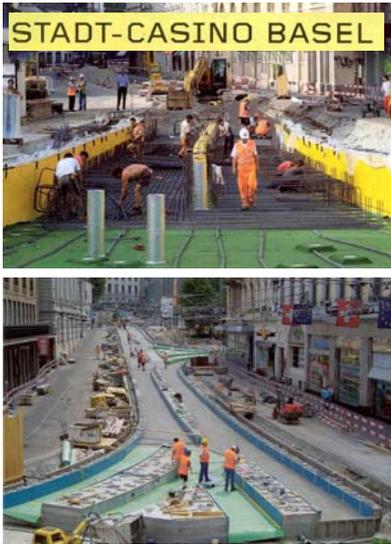
■ **Vor Einbau** ■ **Nach Einbau**

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 - Aktuelle Projekte & Vorhaben -



Stadtcasino Basel

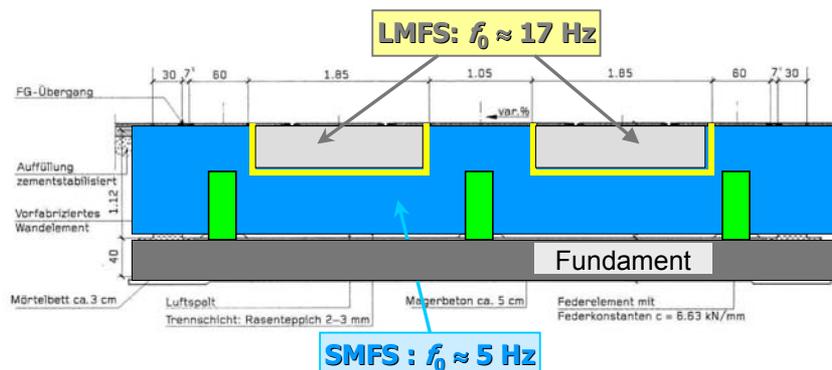
„Schweres MFS“ mit Stahlfedern in Kombination mit einem „Leichten MFS“

- 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

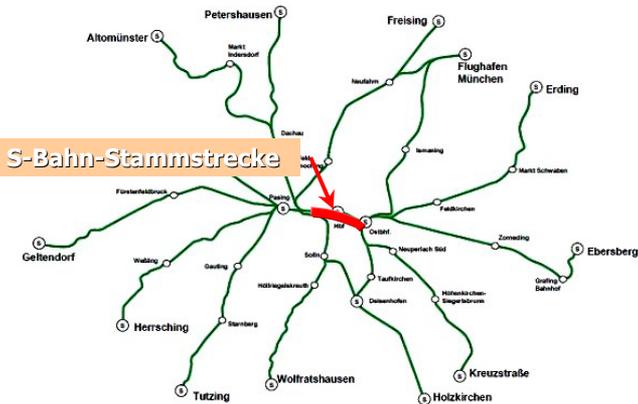
Querschnitt des kombinierten Systems SMFS + LMFS



Quelle: "Stadt-Casino Basel" – Sonderheft von TEC21, Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen u.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)

S-Bahnnetz in München - Bestand

S-Bahn München (Bestand)



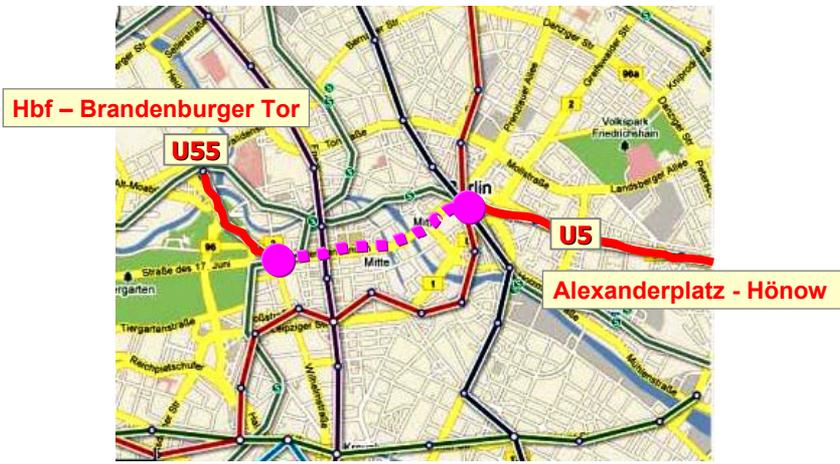
Quelle: http://www.tunnelaktion.de/S-Bahn-Streit/Expertenhearing/Goettler_2SBSS_Hearing_Stadtrat_250309_Praesentation.pdf

Innerstädtischer Ausbau der S-Bahn München S-Bahn-Südring oder 2. S-Bahn-Tunnel ?



Quelle: http://www.tunnelaktion.de/S-Bahn-Streit/Expertenhearing/Goettler_2SBSS_Hearing_Stadtrat_250309_Praesentation.pdf

Berlin-Mitte: Verbindung der U-Bahnlinie U55 mit der U5



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**

Dr.-Ing. habil. Rüdiger G. Wettschureck
Beratender Ingenieur für Technische Akustik

Gstädtstr. 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/>