

Zur erschütterungsmindernden Wirkung von Betontrögen mit Schotteroberbau auf Unterschottermatte

Norbert Breitsamter¹

¹ imb-dynamik GmbH, 82211 Herrsching, E-Mail: nb@imb-dynamik.de

Einleitung

Die DB AG setzt zur Erschütterungsreduktion auf freier Strecke Betontröge mit Unterschottermatten ein. Die dafür angesetzte Einfügungsdämmung (EFD) stützt sich auf umfangreiche Messergebnisse am Streckenabschnitt Baden-Baden-Sinzheim und wurde auf der Daga 2004 in Straßburg vorgestellt [1].

Diese Einfügungsdämmung wird derzeit mit geringen Anpassungen für beliebige Boden- und Projektverhältnisse angesetzt. Aktuelle Erfahrungen zeigen jedoch, dass die angesetzte Wirkung nicht in jedem Fall erreicht wird.

Insgesamt ist zur Absicherung und Weiterentwicklung des Trogsystems eine systematische Untersuchung der Trogwirkung insbesondere in Wechselwirkung mit dem Boden erforderlich.

Dazu wurden aktuelle Wirksamkeitsuntersuchungen durchgeführt:

- Parameterstudien mittels Simulation
- Messungen an Bestandströgen (noch in Auswertung)

Die Parameterstudien sind bereits abgeschlossen und werden im Folgenden vorgestellt.

Prinzipielle Wirkungsweise der Betontröge

Die gesamte Erschütterungsschutzwirkung, quantifiziert als Einfügungsdämmung, setzt sich bei einem Schottertrog aus drei unabhängigen Teilen zusammen:

- Biegesteifigkeit des Betontröges in Zusammenwirkung mit dem Boden
- Dämmwirkung der Unterschottermatte (USM) und Massenimpedanz der Betonplatte
- Daneben wird durch die Schottereinspannung im Trog die Schotterumlagerung reduziert und damit die Gleislageentwicklung tendenziell positiv beeinflusst.

Durch entsprechende Einstellung der Parameter kann es beim Betontrög gelingen, eine über einen weiten Frequenzbereich positive resultierende Einfügungsdämmung (EFD) zu erhalten:

- Niederfrequent positive EFD infolge Biegesteifigkeit und Breite des Betontröges
- Mittelfrequent Heilung des USM-Einbruches durch Biegesteifigkeit und Breite des Betontröges
- Hochfrequent Heilung der infolge Schwingungsmoden negativen Trogplattenwirkung durch die USM

Diese Konstellation wurde bei der Realisierung in Sinzheim auf weichen Böden erreicht und mit großem Aufwand messtechnisch bestätigt.

Untersuchte Parameter

Die Studie hatte den Focus auf die Parameter des Schotteroberbaus (SchO), da diese modelltechnisch zuverlässig abgebildet werden und in einem gewissen Umfang auch beeinflusst werden können.

Im Folgenden wird die Spannweite der Parametervariationen und die jeweilige Referenz (**fett**) zusammengestellt.

Variiert wurden:

USM-Parameter

bei elastischen und harten Zischenlagen (Zw)
Gemäß DIN 45673 [2] werden die Kennwerte C_{stat} und C_{dyn2} verwendet, Dämpfung: $\eta = 0,2$ bzw. Phasenwinkel 11,3%

Tabelle 1: Variation USM-Steifigkeit [N/mm³]

C_{stat} [N/mm ³]	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,20
C_{dyn2} bei 40 Hz	0,033	0,05	0,066	0,083	0,10	0,13	0,17	0,20	0,25	0,33

Schotterparameter:

Schotterbettdicke 25, **30**, 35, 40 cm
Rechnerischer E-Modul: 2×10^8 N/m²
Dämpfung: $\eta = 0,2$; Lastausbreitungswinkel 15°

Zischenlagen-Parameter: Steifigkeit

Tabelle 2: Variation Zw-Steifigkeit [kN/mm]

	Hochelast.	Elastisch	halbbelastisch	hart
C_{stat} [kN/mm]	40	60	120	600
C_{dyn2} bei 40 Hz	68	102	204	1350

Unabgefederte Radsatzmasse

Tabelle 3: Variation Achslasten [to] und unabgefederte Radsatzmasse [kg]

Fahrzeug	Nahverkehr Laufachse	ICE-Mittelwagen Laufachse	Güterzug-achse Laufachse	ICE1-Triebkopf Triebachse
Achslast	12 to	13,5 to	22,5 to	20 to
unabgefedert	10%	13%	10%	15,5 %
Masse	1200 kg	1760 kg	2250 kg	3100 kg

Fahrgeschwindigkeit: 80, 100, 125, 160, 200, 250 km/h

Biegesteifigkeit des Betontröges

Plattendicke 30 ... **60** ... 200 cm

Bodeneigenschaften

Scherwellengeschwindigkeit 200 ... 500 m/s

Ermittelt wird jeweils die Auswirkung auf die Einfügungsdämmung.

Simulationsmodell

Es wurde das Modell iSi (imb-dynamik Rad-Schiene-Interaktionsmodell [3]) eingesetzt.

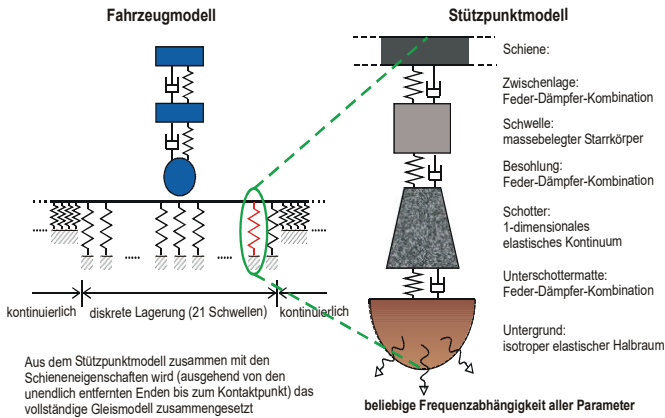


Abbildung 1: iSi-Modell für konventionellem SchO

Die Abbildung 2 zeigt die Modellversion für konventionellen SchO. Für den Betonrog wird unter der USM ein Timoshenkobalken eingefügt.

Die Berechnung findet im Frequenz- bzw. Wellenzahlbereich statt.

Das iSi-Modell ermittelt alle Kraft- und Weggrößen im Fahrweg und ist besonders geeignet für die Berechnung von Einfügungsdämmungen.

Ergebnisse der Parameterstudien

Variation der USM-Steifigkeit

Mit dem Simulationsmodell wurde die EFD einer USM im Betonrog (Troglplattendicke 60 cm) unter einem SchO mit unterschiedlichen Zw ermittelt. Die Abbildung zeigt die Situation mit harten Zw.

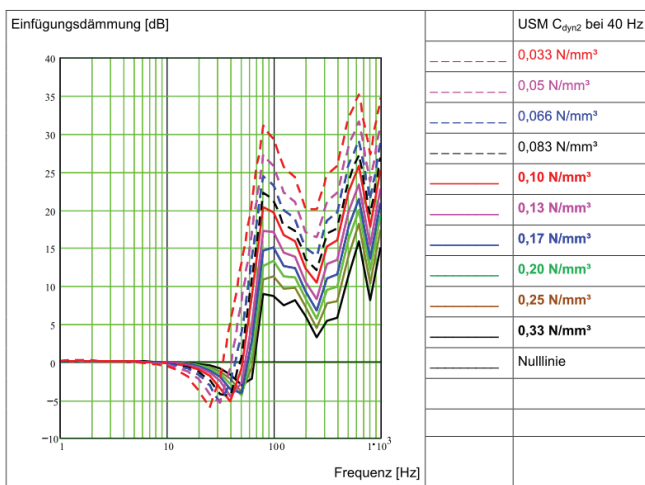


Abbildung 2: EFD einer USM im Betonrog bei harten Zw und Troglplattendicke 60 cm

Das System Radsatz +SchO auf USM stellt mechanisch in erster Näherung einen Einmassenschwinger dar mit einer

typischen Resonanzverstärkung bei Anregung in der Eigenfrequenz dar (Radsatz-Oberbau-Resonanz).

- Die steiferen USM zeigen eine geringere Resonanzverstärkung, da der Abstand zur Resonanz ohne USM zu klein ist, als dass sich die Resonanz in voller Größe in der EFD zeigt (die Vergrößerungsfunktionen beider Systeme neutralisieren sich noch zum Teil).
- Wegen der harten Zw zeigen auch steife USM noch eine Wirkung
- Bei ca. 250 Hz zeigt sich eine deutliche Antiresonanz (Gegenschwingung innerer Freiheitsgrade, hier Schotter + Schwelle zwischen steifer Zw und USM)

Variation der Schotterbettdicke

Die Abbildung zeigt die Auswirkung der Veränderung der Schotterbettdicke im Sinne einer EFD gegenüber der Standarddicke von 30 cm.

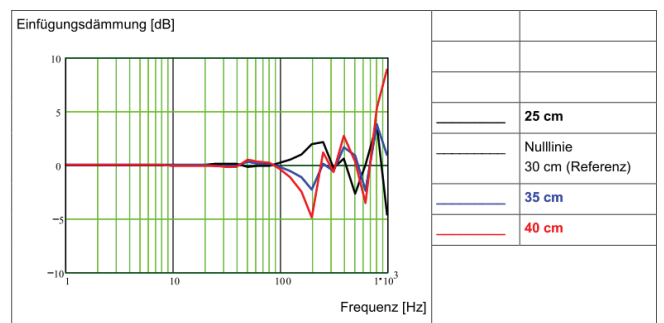


Abbildung 3: EFD einer Veränderung der Schotterbettdicke gegenüber der Referenzdicke von 30 cm in einem Betonrog (Troglplattendicke 60 cm) mit Referenz-USM und harten Zw

- Bis 100 Hz sind die Auswirkungen vernachlässigbar.
- Die Massenänderung und die Steifigkeitsänderung (veränderte wirksame USM-Fläche) kompensieren sich.

Variation der Zw-Steifigkeit

In einem Betonrog mit Referenz-USM wurde die Zw-Steifigkeit variiert und die EFD gegenüber harten Zw ermittelt.

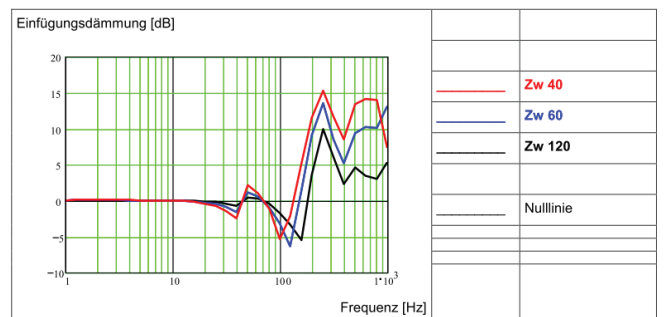


Abbildung 4: EFD elastischer Zw gegenüber harten Zw in einem Betonrog (Troglplattendicke 60 cm) mit Referenz-USM

- Bei 50 Hz ergibt sich eine minimale Verbesserung
- Ab 200 Hz zeigt sich eine starke Reduktion im Sinne einer doppelt elastischen Lagerung

- Bei 40 Hz zeigt sich ein kleiner Einbruch (Resonanz) und bei 100-160 Hz ein weiterer Einbruch (Antiresonanz)

Variation der unabgefederten Radsatzmasse

Es wurde

1. die Massenänderung gegenüber einer Referenzmasse untersucht sowie
2. die EFD einer USM in Abhängigkeit der Radsatzmasse.

Das nachfolgende Bild zeigt die EFD der Massenänderung bei fixer Referenz-USM und harten Zw. Bei höherer (niedrigerer) Radsatzmasse wirkt eine höhere (niedrigere) Kraft aus Differenzweganregungen auf den Oberbau ein. Diese Veränderung ist emissionswirksam wird als EFD aufgefasst.

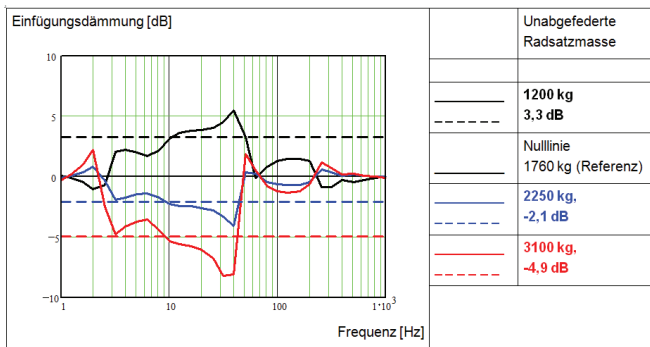


Abbildung 5: EFD einer Veränderung der unabgefederten Radsatzmasse gegenüber der Referenzmasse in einem Betontrog (Trogplattendicke 60 cm) mit Referenz-USM und harten Zw

- Prinzipiell wirkt sich die unabgefederte Radsatzmasse linear auf die Emission aus.
- Dieses Verhältnis zeigt sich tendenziell bei 3-20 Hz.
- Unter 3 Hz (schwach auch noch bei 8 Hz) wirkt sich die Fahrzeugfederung aus.
- Zwischen 20 und 40 Hz wird der Unterschied durch Resonanzverhalten verstärkt.
- Ab 50 Hz verschwindet der Unterschied infolge tiefer Abstimmung bis auf Antiresonanzreste.

Das nachfolgende Bild zeigt die EFD einer Referenz-USM unter Variation der unabgefederten Radsatzmasse.

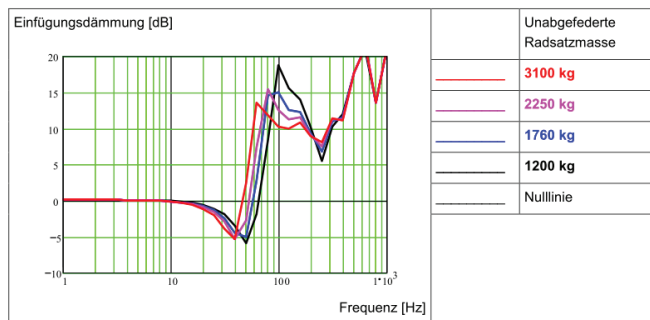


Abbildung 6: EFD einer Referenz-USM unter Variation der unabgefederten Radsatzmasse in einem Betontrog (Trogplattendicke 60 cm) und harten Zw

- Bei höherer unabgefederte Radsatzmasse liegt die Radsatz-Oberbau-Resonanzfrequenz tiefer (Spanne ca. eine Terz, wegen der Mitwirkung der konstanten SchO-Masse unterlinear).

- D.h. bei größerer unabgefederte Radsatzmasse setzt günstigerweise die tiefe Abstimmung und damit die Schutzwirkung spektral früher ein.

Variation der Fahrgeschwindigkeit

Die Fahrgeschwindigkeit wurde in einem weiten Bereich (von 80 bis 250 km/h) variiert und dazu die Anregungsmechanismen Achslasten, Gleislage- und Schienenfehler, Radunrundheiten und Parameteranregung getrennt betrachtet.

Interessant ist das Durchschreiten der Schwellenfachfrequenz durch die Radsatz-Oberbau-Resonanzfrequenz.

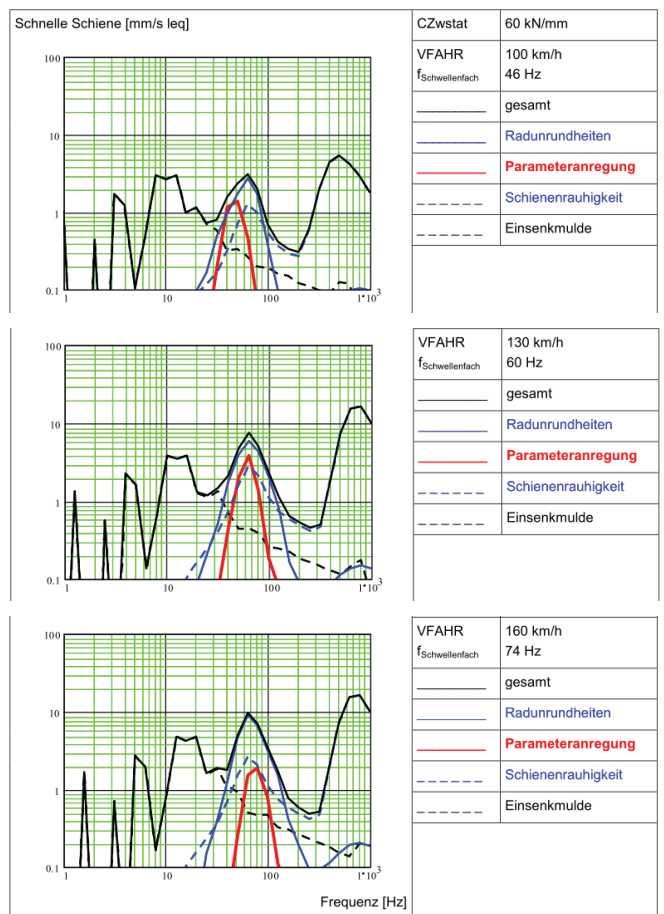


Abbildung 7: Schwingschnelle der Schiene differenziert nach Anregungen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten (keine USM, Zw 60 kN/mm, Trogplattendicke 60 cm)

- Die sonst untergeordnete Parameteranregung durchschreitet bei 130 km/h die Radsatz-Oberbau-Resonanz (60 Hz) und zeigt sich neben Radunrundheiten als pegelwirksam.
- Wegen der Vielzahl an gleichen Quellen wird die Parameteranregung durch den Trog weniger gemindert als z.B. die Anregung aus Radunrundheiten.
- Somit wird die EFD bei glatten Rädern tendenziell niedriger ausfallen.

Biegesteifigkeit des Betontrog

Da das Simulationsmodell den Betontrog als (unendlich langer) Balken abbildet, ist die Querrichtung starr und weist die Längsrichtung keine Schwingungsmoden auf.

In der Realität treten in Querrichtung und bei Blockfugen auch in Längsrichtung Schwingungsmoden auf, die die resultierende Biegesteifigkeit und damit die Wirksamkeit wesentlich reduzieren.

Das nachfolgende Bild zeigt die EFD einer idealen (fugenlosen) Troglplatte in Abhängigkeit der Dicke auf weichem Boden (Scherwellengeschwindigkeit 200 m/s, ohne USM, harte Zw).

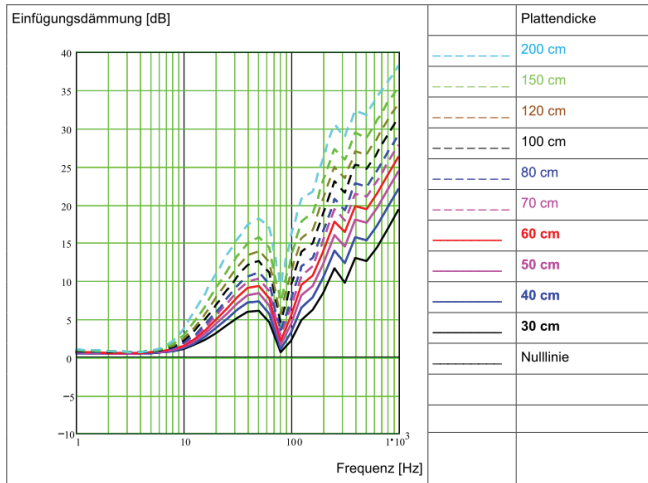


Abbildung 8: EFD einer fugenlosen Troglplatte unter einem harten SchO ohne USM auf weichem Boden (200 m/s)

- Es zeigt sich eine positive EFD zwischen 10 und 63 Hz, ein Einbruch bei 80 Hz (Radsatz-Oberbau-Resonanz) und eine um ca. 20 dB pro Dekade ansteigende EFD ab 100 Hz.
- Je dicker die Sohlplatte, desto größer die Wirkung (Verdopplung bringt ca. 3 dB)
- Trog-Eigenschwingungen quer und längs zwischen Querfugen werden jedoch nicht abgebildet, wodurch das Verhalten über 100 Hz unrealistisch ist.

Bodensteifigkeit

Bei der Referenz-Plattendicke von 60 cm wurde der Boden variiert.

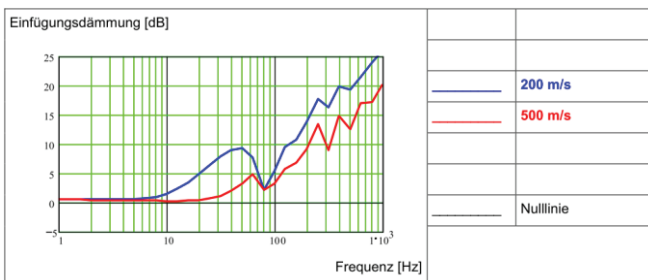


Abbildung 9: EFD einer Troglplatte mit 60 cm Dicke auf weichem (200 m/s) und hartem Boden (500 m/s), ohne USM, harte Zw

- Bei steifem Boden reduziert sich selbst die ideale Plattenwirkung ganz wesentlich.

Fazit

Die USM-Steifigkeit und die Steifigkeit der Troglplatte sind die wichtigsten Einflussfaktoren.

Demgegenüber sind Zw-Steifigkeit und Schotterbettdicke klar untergeordnet.

Für die Reduktion von Erschütterungen in Gebäuden sollte die USM möglichst steif gewählt werden.

Die Einfügungsdämmung ist empfindlich von den Trogeigenschaften in Zusammenwirkung mit dem Boden abhängig (Bauwerk-Boden-Interaktion).

Deshalb ist aktuell stets eine projektspezifische Troganpassung erforderlich.

Literatur

- [1] Müller-Boruttau, F: Aboveground Low Vibration Emission Ballasted Track with Concrete Trough. CFA/DAGA 2004
- [2] DIN 45673 Teil 5: Labor-Prüfverfahren für Unterschottermatten
- [3] www.imb-dynamik.de (Leistungen, Software)