

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

L. Auersch, Bundesamt für Materialforschung und -prüfung BAM, Berlin, D

Abstract

Die Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen haben eine lange Tradition in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Im Jahr 2006 wurde eine Prognose-Software fertiggestellt, die viele Forschungs- und Messergebnisse zusammenfasst. Sie umfasst die Teilbereiche Emission (die Anregung durch die Fahrzeug-Fahrgeweg-Untergrund-Wechselwirkung), die Transmission (die Ausbreitung durch den Boden) und die Immission (die Übertragung vom Freifeld in ein Gebäude). Die Prognose geschieht in allen Teilen mit einfachen Formeln, die veröffentlicht sind und zur Anwendung für Jedermann zur Verfügung stehen. Es werden Beispiele zur Emission und zur Transmission gezeigt.

Im Bereich Transmissionsprognose werden zu den Anregungskräften (aus dem Emissionsteil) die Bodenerschütterungen als Schwinggeschwindigkeitsterzspektren berechnet. Das Ergebnis hängt stark von der Bodensteifigkeit, -dämpfung und -schichtung ab. Dies wurde später mit einer Messkampagne in der Schweiz an 10 Messorten bestätigt (Bild 1). Die Berechnung erfolgt näherungsweise für einen geschichteten Boden mit einer frequenzabhängigen Wellengeschwindigkeit (Dispersion) oder einem tiefenabhängigen Wellengeschwindigkeitsprofil.

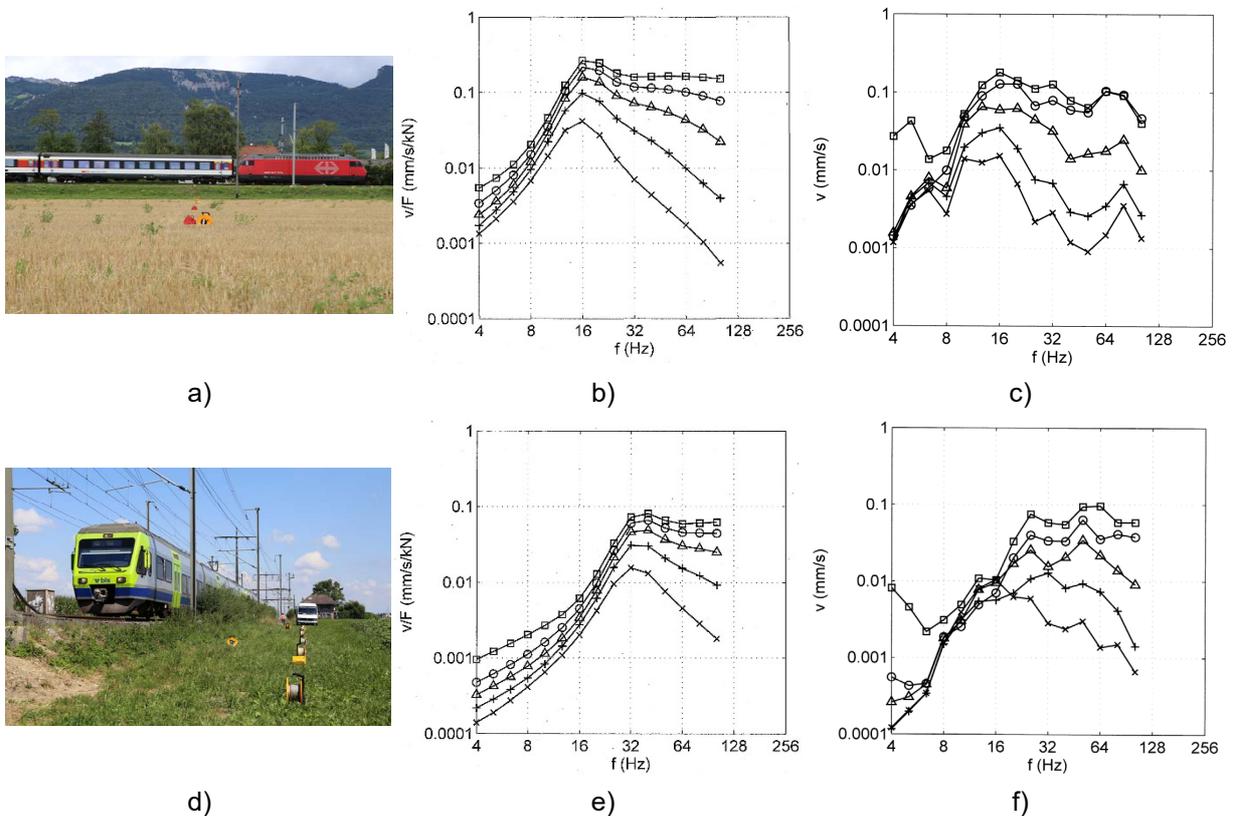


Bild 1: Erschütterungsprognose (b,e) und -messung (c,f) an zwei Schweizer Messorten mit einem weichen (a-c) und einem steifen (d-f) Boden, Entfernungen \square 4, \circ 8, \triangle 16, $+$ 32, \times 64 m.

Die Anregungskräfte werden im Prognosebereich Emission mit einem 2-dimensionalen Gleismodell berechnet (Bild 2). 1-dimensionale Modelle liefern meist falsche Ergebnisse und 3-dimensionale Modelle (zum Beispiel mit der kombinierten Finite-Elemente-Randelement-Methode) sind für eine Erschütterungsprognose sicherlich zu aufwändig. Das 2-dimensionale Modell wurde an 3-dimensionale Ergebnisse so angepasst, dass die Ergebnisse für viele Gleise und Böden annähernd zutreffen. Auch Minderungsmaßnahmen am Gleis können mit diesem Modell sehr gut berechnet werden.

Die Prognoseverfahren wurden in den folgenden Jahren weiter verfeinert. Es wurde die quasi-statische Anregung durch die bewegten statischen Zuglasten mit einer Näherungsformel ergänzt, so dass auch das tieffrequente Nahfeld realistisch erfasst werden kann. Mit der Berücksichtigung der Achsfolge (insbesondere zwischen den Achsen im Drehgestell) ergeben sich zwei typische Minima in den Erschütterungsspektren, die oft auch in den Messungen beobachtet werden. Der Amplitudenanteil zwischen diesen beiden Minima ist oft stärker angehoben, so dass hier eine zusätzliche Erschütterungsanregung vermutet wird. Dieser Anteil kann rein empirisch prognostiziert werden, so wie das in den englischen Prognosen (zuletzt für das Highspeed2-Projekt) enthalten ist. Die Begründung dieses Anteils ist allerdings nicht die Achsfolge, sondern die Zerstreuung der statischen Achslastimpulse durch einen unregelmäßigen Gleisuntergrund und Boden.

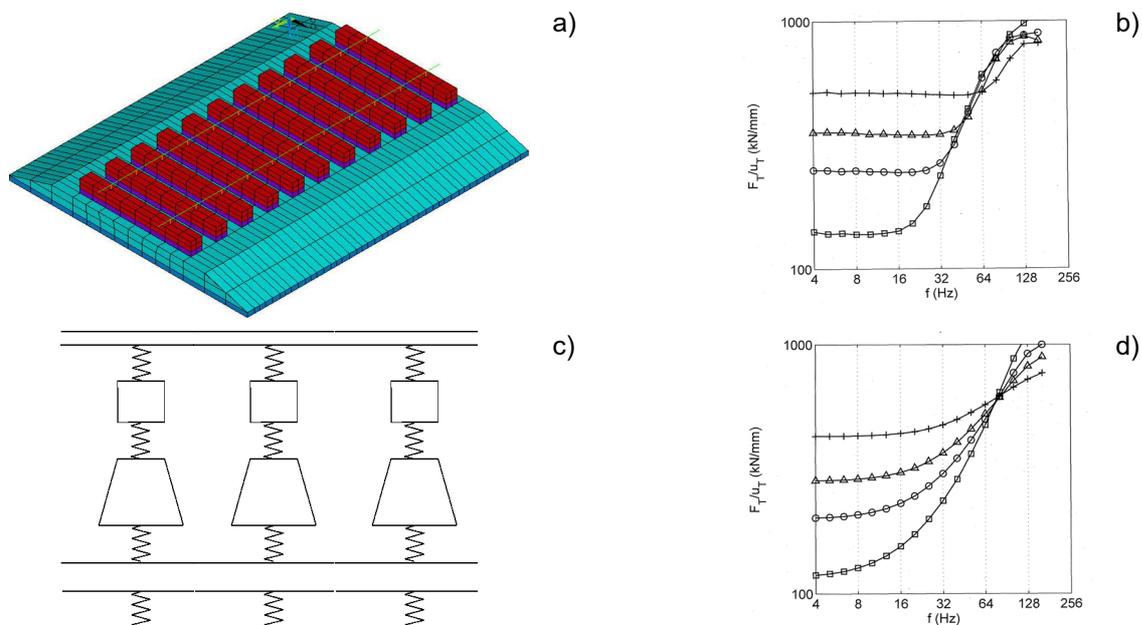


Bild 2: Gleissteifigkeit für verschiedene Böden aus 3-dimensionaler und 2-dimensionaler Berechnung

Die messtechnische Ermittlung eines Minderungseffektes ist komplizierter als allgemein angenommen. Es reicht nicht aus, jeweils an einem Messpunkt in der Nähe eines Gleises mit und ohne Minderungsmaßnahme die Erschütterungen zu messen und aus dem Verhältnis der Amplituden (beziehungsweise aus der Differenz der Pegel) „die Einfügedämmung“ zu ermitteln. Es wird an Beispielen gezeigt, wie man hier sinnvoller vorgehen kann.

1. Zunächst ist es wichtig, nicht nur die Einfügedämmung sondern auch die Originalspektren mit und ohne Minderung zu dokumentieren und zu veröffentlichen, damit man kontrollieren kann, ob wesentliche Amplituden und Frequenzbereiche reduziert sind oder ob es sich um eher zufällige Minderungen oder Verstärkungen handelt. (Beispiel Unterschottermatte/Raron, Müller/SBB)
2. Der Messpunkt sollte nicht im Nahbereich des Gleises liegen, da ansonsten eine zu günstige, falsche Einfügedämmung bestimmt wird. (Beispiel Tunnel/ Leipzig/Breitsamter)

3. Um Zufälligkeiten zu vermeiden, sollte man an mehr als einem Punkt messen. (Beispiel Unterschotterplatte/Altheim/Auersch)
4. Man sollte eigentlich immer auch die Bodenkennwerte (Steifigkeit, Dämpfung, Amplitudenabnahme, Übertragungsfunktion) messen. Selbst bei nahegelegene Messquerschnitten kann man Überraschungen erleben. (Beispiel erste ICE-Messungen/bei Würzburg/Auersch)
5. Bei verschiedenen Bodenkennwerten kann man eine Korrektur durchführen. (Beispiel Gleiströge/Mistler) Am besten bestimmt man ein äquivalentes Kraftspektrum zu jedem Messort und jedem Messzug (Beispiel Feste Fahrbahn/Gardelegen/Auersch)
6. Prinzipiell gibt es nicht die Einfügedämmung einer Maßnahme. Die Einfügedämmung ist immer boden- und referenzsystemabhängig. Die „beste“ Einfügedämmung erhält man mit einem steifen Untergrund (Beispiel Unterschottermatte/Tunnel/München Gasteig/Wettschureck) Das heißt aber nicht, dass die Maßnahme durch einen künstlich versteiften Untergrund besser wird (Beispiel Unterschottermatten/RRT2006/Auersch)

Es werden Messbeispiele gezeigt, die alle neben einer hochfrequenten dynamischen Minderung auch eine mittelfrequente quasi-statische Minderung aufweisen. Dabei wird der mittelfrequente Zerstreuanteil der statischen Achslastimpulse durch die breitere Lastverteilung und damit die Impulsdehnung der Achslastimpulse reduziert. Diese Impulsdehnung lässt sich mit dem 2-dimensionalen Gleismodell berechnen. Die Minderungswirkung hängt aber wiederum vom Referenzsystem und dessen unregelmäßiger Steifigkeitsverteilung ab. Je unregelmäßiger der Boden und Gleisuntergrund des Referenzsystems, desto stärker ist die Minderungswirkung.

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

L. Auersch

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, D 12200 Berlin
Lutz.auersch-saworski@bam.de

1. Einleitung

Die Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen haben eine lange Tradition in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Im Jahr 2006 wurde eine Prognose-Software fertiggestellt, die viele Forschungs- und Messergebnisse zusammenfasst. Sie umfasst die Teilbereiche Emission (die Anregung durch die Fahrzeug-Fahrweg-Untergrund-Wechselwirkung), die Transmission (die Ausbreitung durch den Boden) und die Immission (die Übertragung vom Freifeld in ein Gebäude). Die Prognose geschieht in allen Teilen mit einfachen Formeln, die veröffentlicht sind und zur Anwendung für Jedermann zur Verfügung stehen. Es werden Beispiele zur Emission und zur Transmission gezeigt.

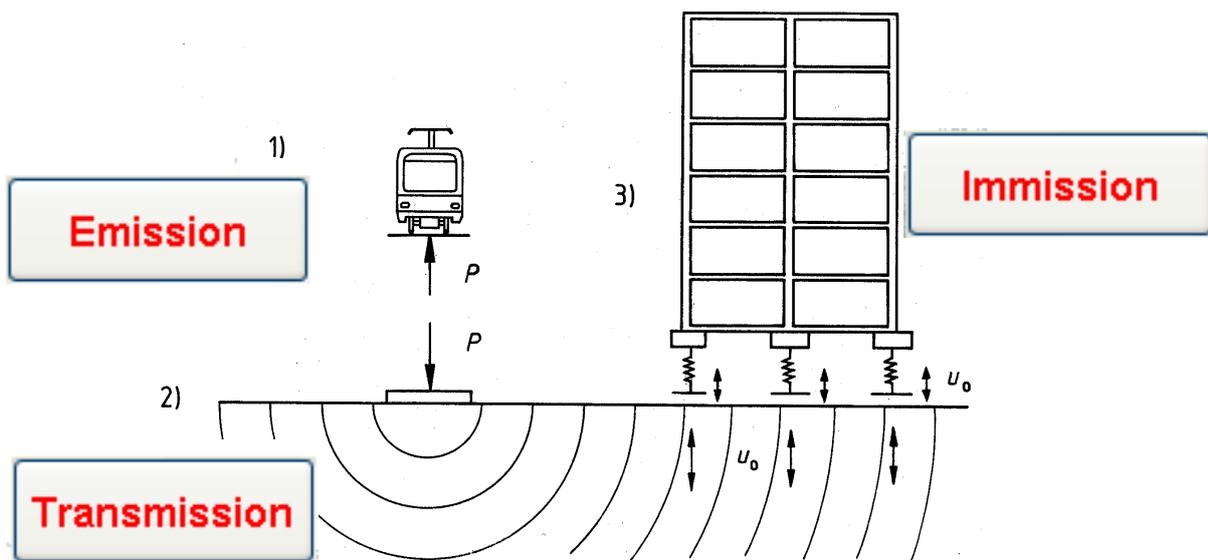


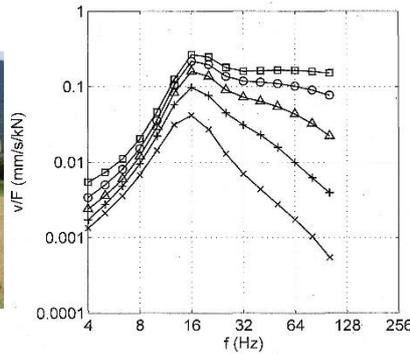
Bild 1: Die Teilbereiche der Erschütterungsprognose

2. Erschütterungsausbreitung durch den Boden (Transmissionsprognose)

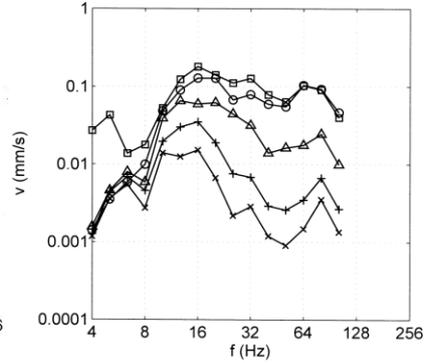
Im Bereich Transmissionsprognose werden zu den Anregungskräften (aus dem Emissionsteil) die Bodenerschütterungen als Schwinggeschwindigkeitsterzspektren berechnet. Das Ergebnis hängt stark von der Bodensteifigkeit, -dämpfung und -schichtung ab. Dies wurde später mit einer Messkampagne in der Schweiz an 10 Messorten bestätigt (Bild 1). Die Berechnung erfolgt näherungsweise für einen geschichteten Boden mit einer frequenzabhängigen Wellengeschwindigkeit (Dispersion) oder einem tiefenabhängigen Wellengeschwindigkeitsprofil.



a)



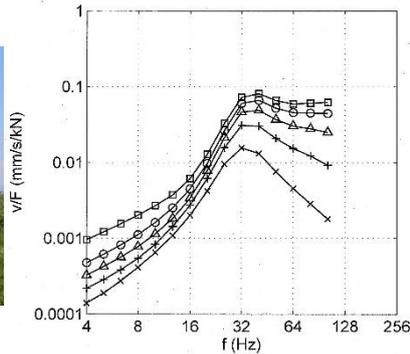
b)



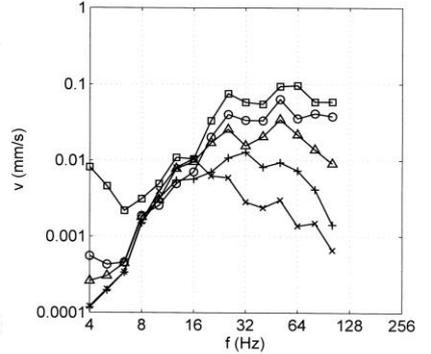
c)



d)



e)

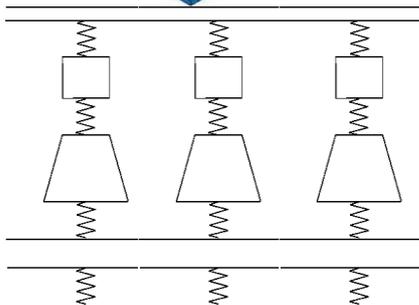
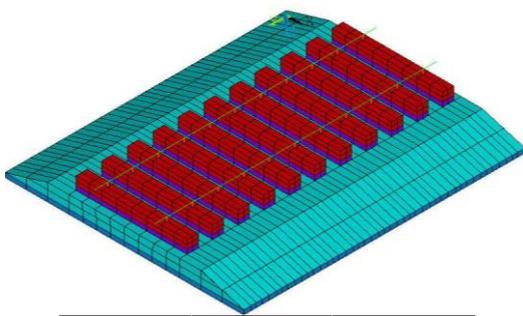


f)

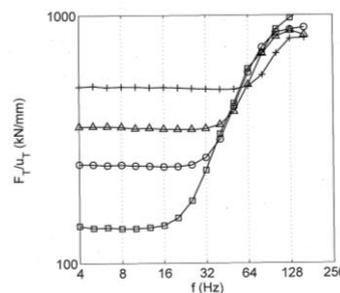
Bild 2. Erschütterungsprognose (b,e) und -messung (c,f) an zwei Schweizer Messorten mit einem weichen (a-c) und einem steifen (d-f) Boden, Entfernungen \square 4, \circ 8, \triangle 16, $+$ 32, \times 64 m.

3. Lastentstehung im Zusammenwirken von Fahrzeug und Gleis (Emissionsprognose)

Die Anregungskräfte werden im Prognosebereich Emission mit einem 2-dimensionalen Gleismodell berechnet (Bild 2). 1-dimensionale Modelle liefern meist falsche Ergebnisse und 3-dimensionale Modelle (zum Beispiel mit der kombinierten

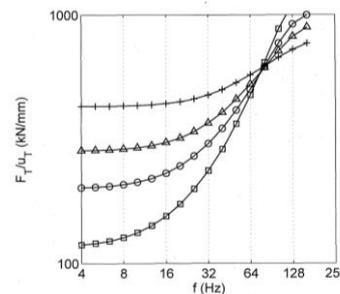


a)



b)

c)



d)

Bild 3. Gleissteifigkeit für verschiedene Böden aus 3-dimensionaler und 2-dimensionaler Berechnung, $v_s = \square$ 100, \circ 150, \triangle 200, $+$ 300 m/s.

Finite-Element-Randelement-Methode) sind für eine Erschütterungsprognose sicherlich zu aufwändig. Das 2-dimensionale Modell wurde an 3-dimensionale Ergebnisse so angepasst, dass die Ergebnisse für viele Gleise und Böden annähernd zutreffen. Auch Minderungsmaßnahmen am Gleis können mit diesem Modell sehr gut berechnet werden.

Der fahrende Zug leitet Kräfte in den Fahrweg ein, die die Ursache für die Erschütterungen in der Umgebung sind. Als Anregung wirken Störungen an der Kontaktstelle zwischen Fahrzeug und Fahrweg, im Wesentlichen sind dies die Gleislagefehler und die Unrundheiten der Räder, die als Störgrößen s zusammengefasst werden können. Die Übertragungsfunktion zwischen diesen Störgrößen s und den dynamischen Radlasten F kann mit den Gleissteifigkeiten des vorangegangenen Abschnitts und mit einem einfachen Fahrzeugmodell (zum Beispiel als ein starrer Radsatz) berechnet werden. Die Fahrwegnachgiebigkeit ergibt mit der Radsatzmasse eine Fahrzeug-Gleis-Eigenfrequenz, hier bei etwa 80-100 Hz. Bei dieser Radsatz-Gleis-Eigenfrequenz gibt es leicht erhöhte dynamische Achslasten, bei höheren Frequenzen sind die Kräfte dann abgemindert.

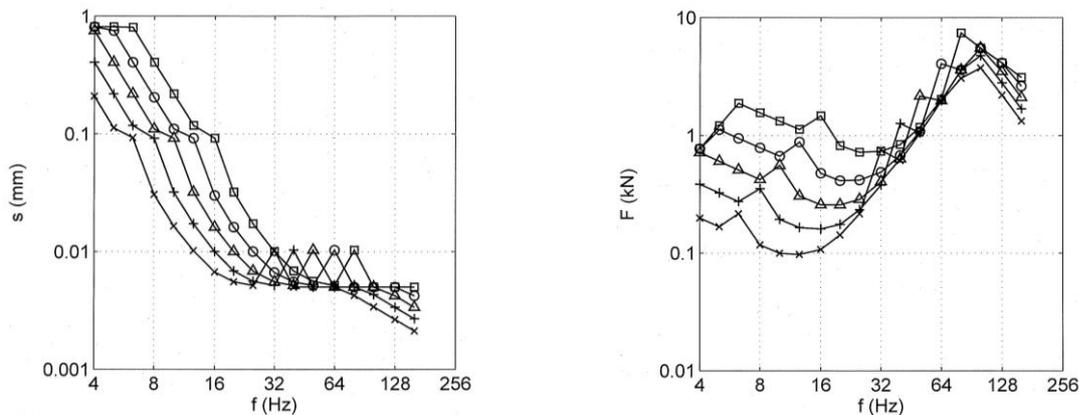


Bild 4. Die Störgrößen (links) und die Anregungskräfte der Erschütterungen (rechts), Zuggeschwindigkeit \square 160, \circ 125, \triangle 100, $+$ 80, \times 63 m.

Mit elastischen Elementen im Gleis wie Schienenlager, Schwellensohlen und Unterschottermatten kann man die Radsatz-Gleis-Eigenfrequenz nach unten verschieben und damit den Bereich der hochfrequenten Kraftminderung vergrößern. Eigenfrequenzen von 60 bis hinunter zu 20 Hz sind prinzipiell erreichbar.

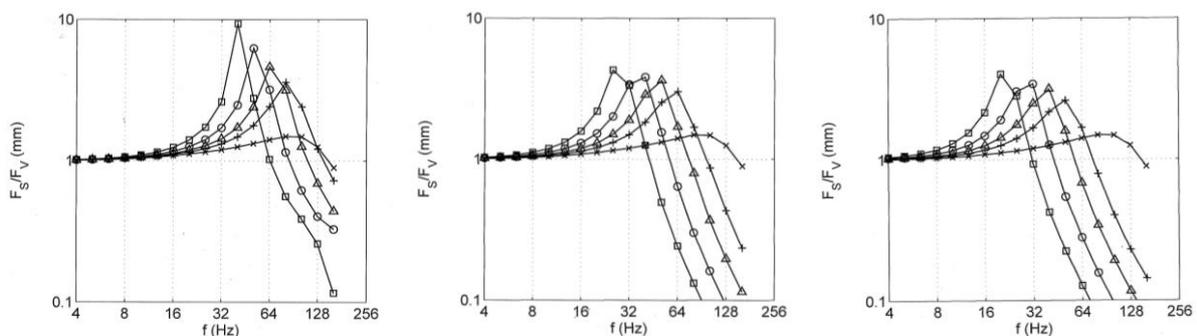


Bild 5. Die Kraftminderung von a) elastischen Schienenlagern, b) Schwellensohlen und c) Unterschottermatten, Variation der Federsteifigkeiten

4. Verfeinerte Prognose: Quasistatik, Achsfolge und eine mittelfrequente Komponente

Die Prognoseverfahren wurden in den folgenden Jahren weiter verfeinert. Es wurde die quasi-statische Anregung durch die bewegten statischen Zuglasten mit einer Näherungsformel ergänzt, so dass auch das tieffrequente Nahfeld realistisch erfasst werden kann. Mit der Berücksichtigung der Achsfolge (insbesondere zwischen den Achsen im Drehgestell) ergeben sich zwei typische Minima in den Erschütterungsspektren, die oft auch in den Messungen beobachtet werden. Der Amplitudenanteil zwischen diesen beiden Minima ist oft stärker angehoben, so dass hier eine zusätzliche Erschütterungsanregung vermutet wird. Dieser Anteil kann rein empirisch prognostiziert werden, so wie das in den englischen Prognosen (zuletzt für das Highspeed2-Projekt) enthalten ist. Die Begründung dieses Anteils ist allerdings nicht die Achsfolge, sondern die Zerstreung der statischen Achslastimpulse durch einen unregelmäßigen Gleisuntergrund und Boden.

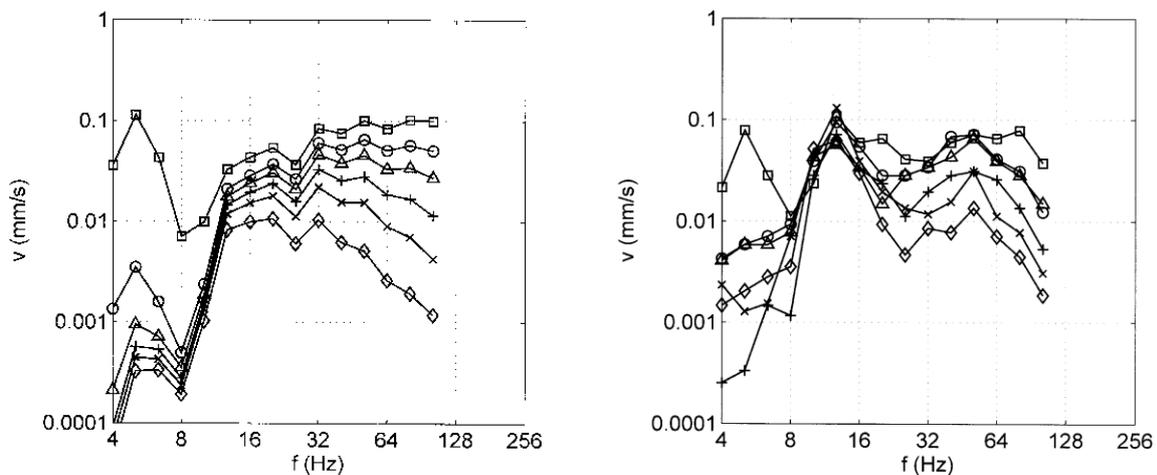


Bild 6. Verfeinerte Prognose (links) mit der tieffrequenten Quasistatik, den Achsfolgeminima bei 8 und 25 Hz, und Messungen mit der zusätzlichen mittelfrequenten Komponente, Entfernungen \square 4, \circ 8, \triangle 16, $+$ 32, \times 64 m

5. Erschütterungsminderung durch eine weiche Auflagerung und eine große Biegesteifigkeit des Gleises

Die messtechnische Ermittlung eines Minderungseffektes ist komplizierter als allgemein angenommen. Es reicht nicht aus, jeweils an einem Messpunkt in der Nähe eines Gleises mit und ohne Minderungsmaßnahme die Erschütterungen zu messen und aus dem Verhältnis der Amplituden (beziehungsweise aus der Differenz der Pegel) „die Einfügedämmung“ zu ermitteln. Es wird an Beispielen gezeigt, wie man hier sinnvoller vorgehen kann.

1. Zunächst ist es wichtig, nicht nur die Einfügedämmung sondern auch die Originalspektren mit und ohne Minderung zu dokumentieren und zu veröffentlichen, damit man kontrollieren kann, ob wesentliche Amplituden und Frequenzbereiche reduziert sind oder ob es sich um eher zufällige Minderungen oder Verstärkungen handelt. (Beispiel Unterschottermatte/Raron, Müller/SBB)
2. Der Messpunkt sollte nicht im Nahbereich des Gleises liegen, da ansonsten eine zu günstige, falsche Einfügedämmung bestimmt wird. (Beispiel Tunnel/Leipzig/Breitsamter)

3. Um Zufälligkeiten zu vermeiden, sollte man an mehr als einem Punkt messen. (Beispiel Unterschotterplatte/Altheim/Auersch)
4. Man sollte eigentlich immer auch die Bodenkennwerte (Steifigkeit, Dämpfung, Amplitudenabnahme, Übertragungsfunktion) messen. Selbst bei nahegelegene Messquerschnitten kann man Überraschungen erleben. (Beispiel erste ICE-Messungen/bei Würzburg/Auersch)
5. Bei verschiedenen Bodenkennwerten kann man eine Korrektur durchführen. (Beispiel Gleiströge/Mistler) Am besten bestimmt man ein äquivalentes Kraftspektrum zu jedem Messort und jedem Messzug (Beispiel Feste Fahrbahn/Gardelegen/Auersch)
6. Prinzipiell gibt es nicht die Einfügedämmung einer Maßnahme. Die Einfügedämmung ist immer boden- und referenzsystemabhängig. Die „beste“ Einfügedämmung erhält man mit einem steifen Untergrund (Beispiel Unterschottermatte/Tunnel/München Gasteig/Wettschureck) Das heißt aber nicht, dass die Maßnahme durch einen künstlich versteiften Untergrund besser wird (Beispiel Unterschottermatten/RRT2006/Auersch)

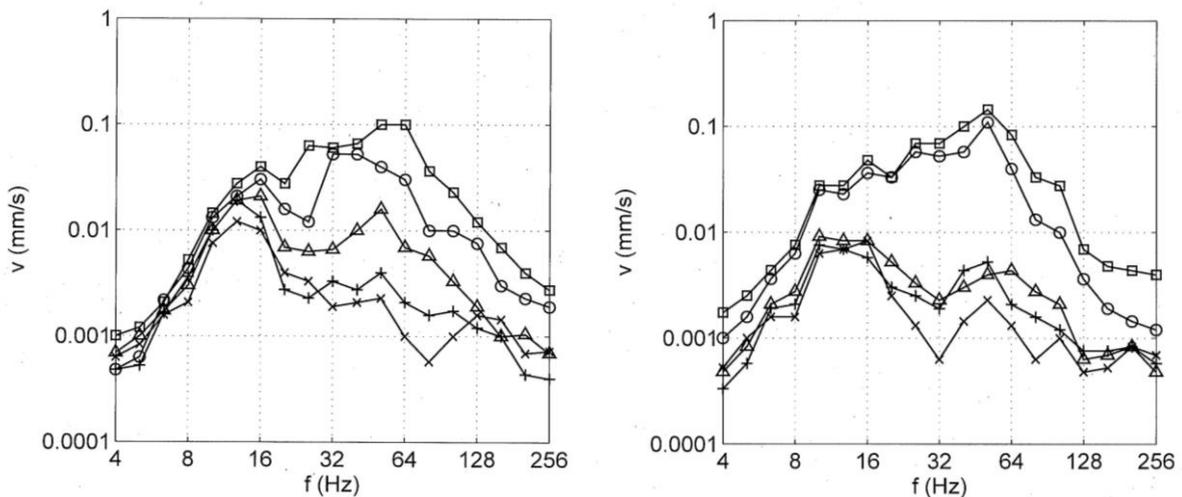


Bild 7. Zegerschütterungen auf einer Messachse von 8 bis 50 m, ohne (links) und mit (rechts) Unterschotterplatte, Entfernungen \square 7, \circ 10, \triangle 20, $+$ 30, \times 50 m.

Es werden Messbeispiele gezeigt, die alle neben einer hochfrequenten dynamischen Minderung auch eine mittelfrequente quasi-statische Minderung aufweisen. Dabei wird der mittelfrequente Zerstreuteil der statischen Achslastimpulse durch die breitere Lastverteilung und damit die Impulsdehnung der Achslastimpulse reduziert. Diese Impulsdehnung lässt sich mit dem 2-dimensionalen Gleismodell berechnen. Die Minderungswirkung hängt aber wiederum vom Referenzsystem und dessen unregelmäßiger Steifigkeitsverteilung ab. Je unregelmäßiger der Boden und Gleisuntergrund des Referenzsystems, desto stärker ist die Minderungswirkung.

Literatur

Prognose allgemein

H. Kuppelwieser, A. Ziegler, A tool for predicting vibration and structure-borne noise immissions caused by railways. JSV, 193(1), 1996, 261-267.

U. Gerstberger, L. Auersch, C. Meinhardt, W. Rücker: Ein einfach handhabbares Prognoseprogramm für Schienenverkehrserschütterungen. VDI-Berichte 1941 Baudynamik, VDI Verlag, Düsseldorf 2006, 19-28

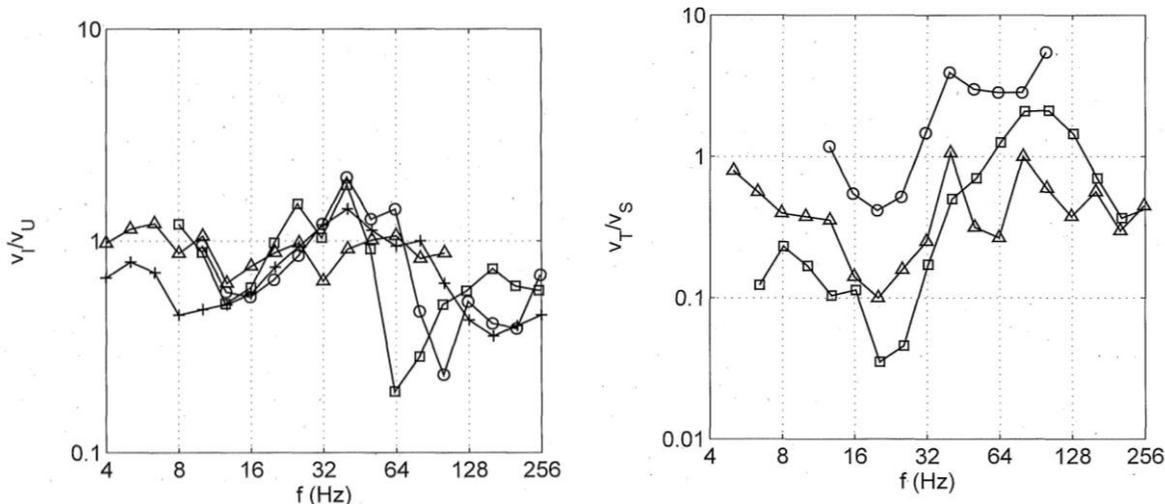


Bild 8. Minderungswirkung von (links) ○ Unterschottermatten (SBB), □ Schwellensohlen (BAM), △ Unterschotterplatten (BAM), + Gleiströgen (Mistler), und von Tunneln (rechts) ○ mit Fester Fahrbahn (AIT), △ auf dem Boden (KIT), und □ Prognose (HS2).

V. Jurdic, O. Bewes, R. Greer, T. Marshall: Developing prediction model for ground-borne noise and vibration from high speed trains running at speeds in excess of 300 km/h. Proceedings of the 21th International Congress on Sound and Vibration, Beijing, 2014, 1-9.

L. Auersch: Simple and fast prediction of train-induced track forces, ground and building vibrations. Railway Engineering Science, 28(3), 2020, 232-250.

Emission

L. Auersch: Theoretical and experimental excitation force spectra for railway induced ground vibration – vehicle-track soil interaction, irregularities and soil measurements. Vehicle System Dynamics 48, 2010, 235-261.

L. Auersch: Emission of train-induced ground vibration — Prediction of axle-load spectra and its experimental verification. International Journal of Acoustics and Vibrations, 22(1), 2017, 74-83.

L. Auersch: Train-induced ground vibration due to the irregularities of the soil. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 140, 2021, 106438.

L. Auersch: Different types of continuous track irregularities as sources of train-induced ground vibration and the importance of the random variation of the track support. Applied Sciences 2022, 12 (3), 12031463.

L. Auersch: The role of vehicle dynamics in train-induced ground vibrations and the detection of irregular axle-pulse responses due to a varying track support stiffness. Rail and Rapid Transport, 236 (10), 1218-1233.

Transmission

L. Auersch: Wave propagation in layered soil: theoretical solution in wavenumber domain and experimental results of hammer and railway traffic excitation. Journal of Sound and Vibration, 173 (2), S. 233-264, 1994

L. Auersch: The use and validation of measured, theoretical and approximated point-load solutions for the prediction of train induced vibration in homogeneous and inhomogeneous soils. *International Journal of Acoustics and Vibrations*, 19(1), 2014, 52-64.

L. Auersch: Train-induced ground vibration due to the irregularities of the soil. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 140, 2021, 106438.

Immission

L. Auersch: Building response due to ground vibration – simple prediction model based on experience with detailed models and measurements. *International Journal of Acoustics and Vibrations* 15 (3), 2010, 101-112

L. Auersch, S. Ziemens: The response of different buildings to free-field excitation – a study using detailed finite element models. In: M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, C. Papadimitriou (eds.) *EURODYN 2020 XI International Conference on Structural Dynamics*, Athens, Greece (Internet), 23–26 November 2020, 4560-4576.

L. Auersch: Prediction of building noise and vibration – 3D finite element and 1D wave propagation models. *Proceedings of Euronoise 2021 LNEC*, Lissabon 2021.

Minderung

U. Kurze, R. Wettschureck: Erschütterungen in der Umgebung von flach liegenden Eisenbahntunneln im Vergleich mit freien Strecken. *Acustica* 58, 1985, 170-176.

F. Müller-Boruttau, V. Rosenthal, N. Breitsamter: Aboveground low vibration emission ballasted track with concrete trough. *Proceedings of CFA/DAGA'04 Conference*, Strasbourg, 2004; 1087-1088.

L. Auersch: Dynamic axle loads on tracks with and without ballast mats – numerical results of three-dimensional vehicle-track-soil models. *Journal of Rail and Rapid Transit* 220 (2), 2006, 169-183.

R. Garburg: Under sleeper pads. *UIC Report*, Deutsche Bahn, Berlin 2007.

D. Stiebel: Influence of undersleeper pads on noise and vibration transmission based on measurements of the project partners. *UIC Report*, Deutsch Bahn München, 2007.

R. Müller: Under ballast mats (UBM) – Insertion loss. *Technical report for UIC*, SBB Bern, 2008.

M. Mistler, D. Heiland: Experimental investigation of the insertion loss of under-sleeper pads. *Report for RIVAS*, Ingenieurbüro Heiland, Bochum, 2013.

L. Auersch, E. Bongini, R. Garburg, S. Schwieger, L. Pesqueux, A. Pieringer: Results of field test of slab track mitigation measures. *RIVAS Report 3.14*, UIC, Paris, 2013.

A. Pieringer, L. Auersch, R. Garburg, S. Schwieger, E. Bongini: Results of field test for ballasted track mitigation, *RIVAS Report 3.15*, UIC, Paris, 2013.

N. Breitsamter: CityTunnel Leipzig und neuer Kaiser Wilhelm-Tunnel – Messtechnischer Nachweis der Einfügungsdämmung. *VDI Bericht "Baudynamik 2015"*, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2015, 277-292.

L. Auersch: Tracks with under-ballast plates and their mitigation of train induced ground vibration. Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration, London, 23-27 July 2017, 1-8.

B. Tappauf et al.: Erschütterungsschutz im Nahverkehr. Bauingenieur 94 (2), 2019, 71-80.

R. Garburg, C. Frank, M. Mistler: Investigation of vibration mitigation by concrete trough with integrated under ballast mats for surface-railways. Proc. Int. Workshop on Railway Noise and Vibration, Ghent, KU Leuven, 2019, 1-8.

B. Tappauf, K. Alten. Admittanzorientierte Erschütterungsprognose an der Bahn. 23. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen. EMPA, Dübendorf, 2022, 1-9.

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Sicherheit in Technik und Chemie

FREQUENZ- UND BODENABHÄNGIGE PROGNOSE UND MINDERUNG VON BAHNERSCHÜTTERUNGEN

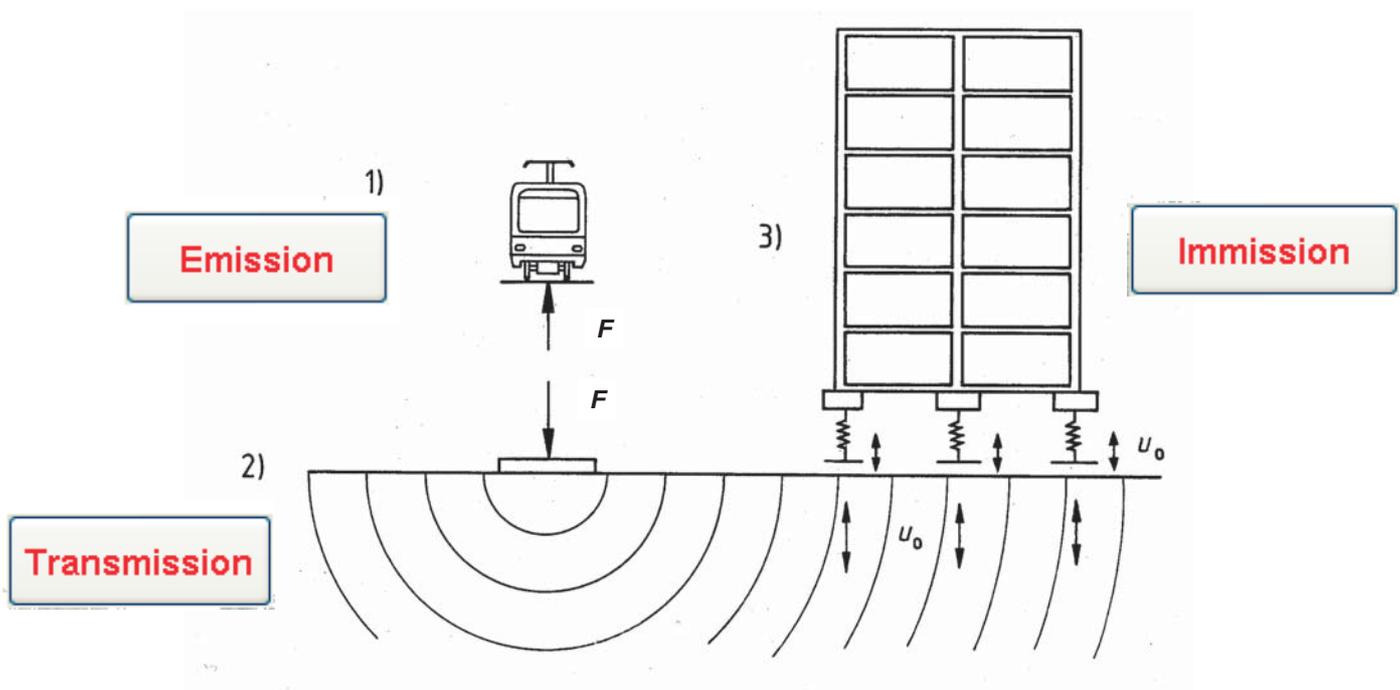
L. Auersch

Federal Institute of Material Research and Testing, Berlin, Germany

BAM 7.2

24. Symposium für Baudynamik und Erschütterungsmessungen, Zürich, 9. Juni 2023

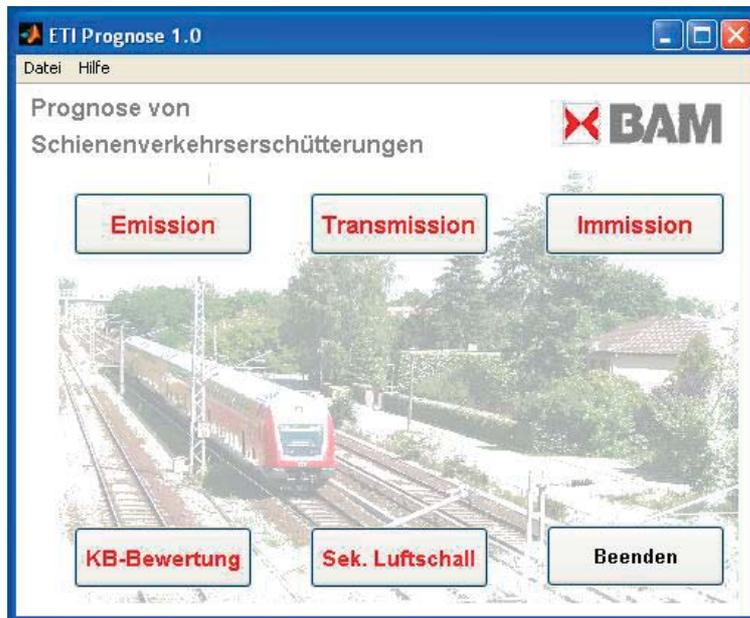
Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



BAM 7.2

24. Symposium für Baudynamik und Erschütterungsmessungen, Zürich, 9. Juni 2023

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

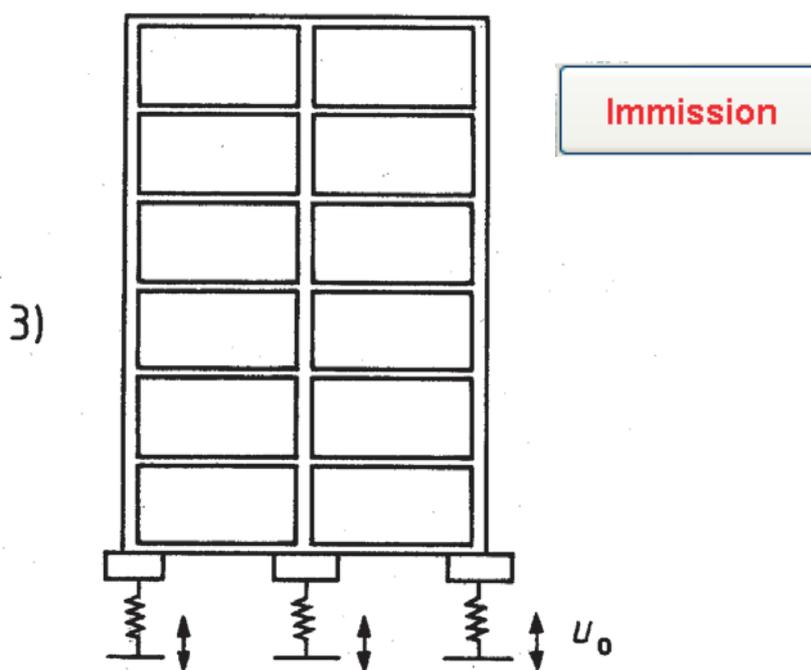


Simple input

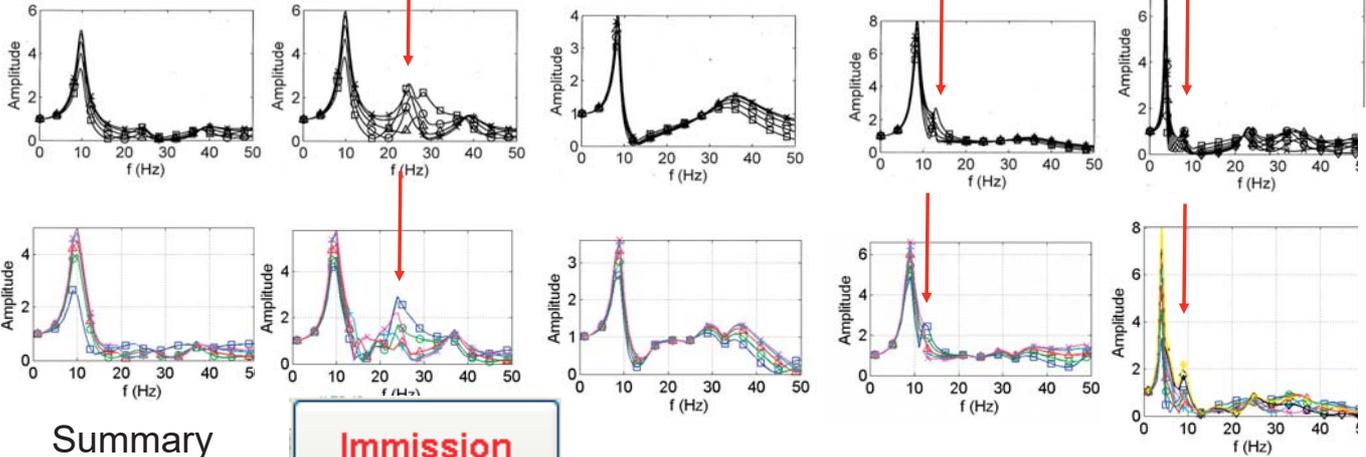
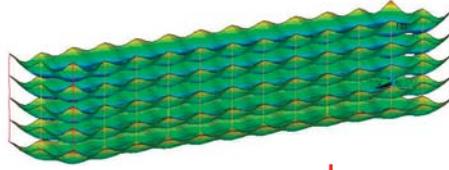
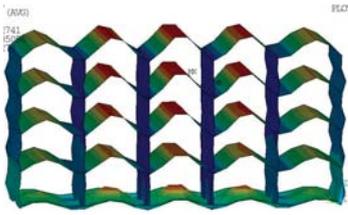
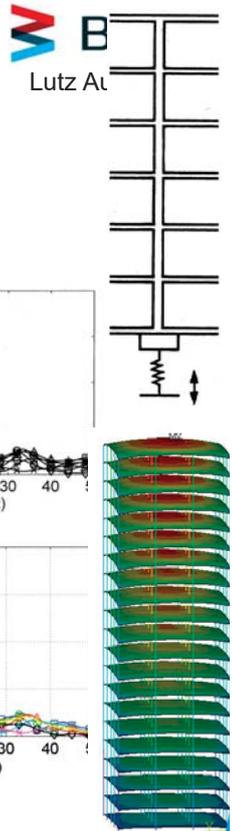
Fast calculation

Clear output

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



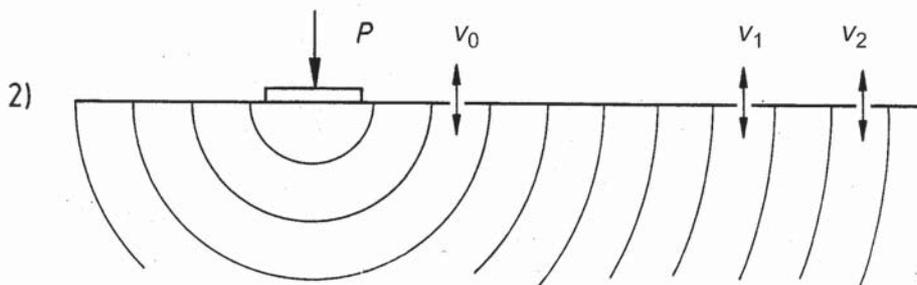
Summary

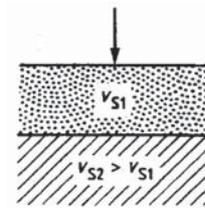
Immission

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



Transmission





Transfer functions of the layered soil

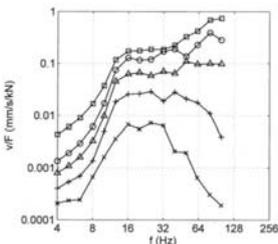
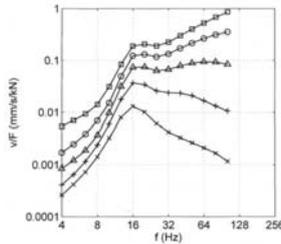
Approximate solution
(not approximation of results)



Infinite wavenumber integral
over layer matrices

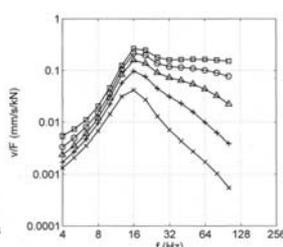
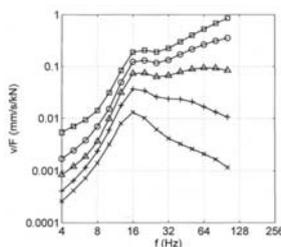
$$\frac{v}{F}(r, f) = f \int_0^{\infty} N_{zz}(f, k) J_0(kr) k dk$$

- 4 m
- 8 m
- △ 16 m
- + 32 m
- × 64 m



Transfer functions of the layered soil

- 4 m
- 8 m
- △ 16 m
- + 32 m
- × 64 m

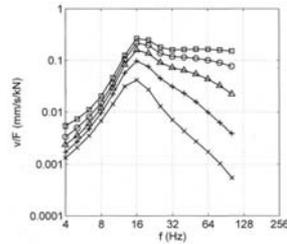


Point load → Train load



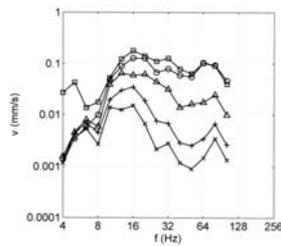
Train induced ground vibrations

- 4 m
- 8 m
- △ 16 m
- + 32 m
- × 64 m



Predicted
for a standard load

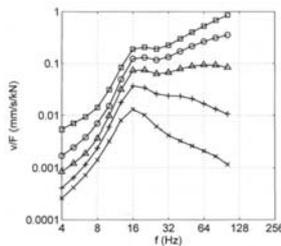
≈



Measured
for a soft soil

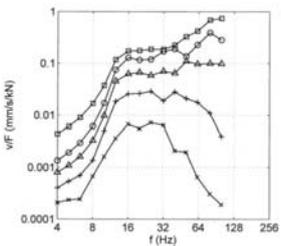


- 4 m
- 8 m
- △ 16 m
- + 32 m
- × 64 m

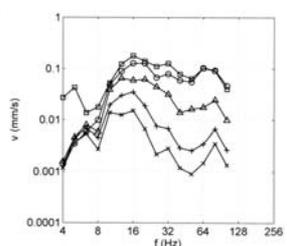
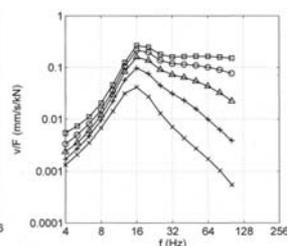


Predicted
for a standard load

≈

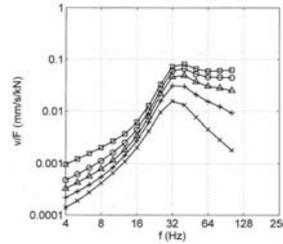
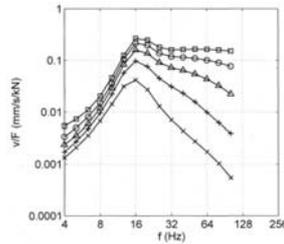


Measured
for a soft soil





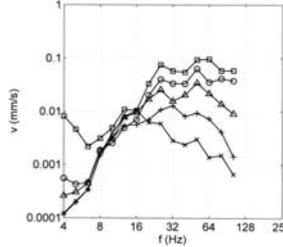
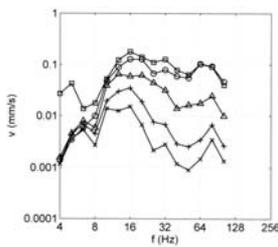
- 4 m
- 8 m
- △ 16 m
- + 32 m
- × 64 m



Predicted
for a standard load

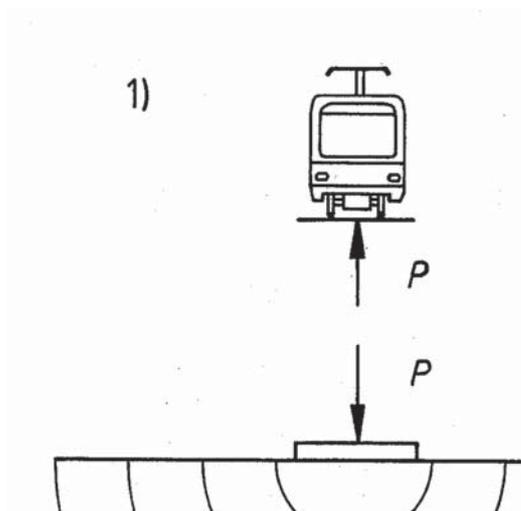
≈

Measured
for a **soft** soil



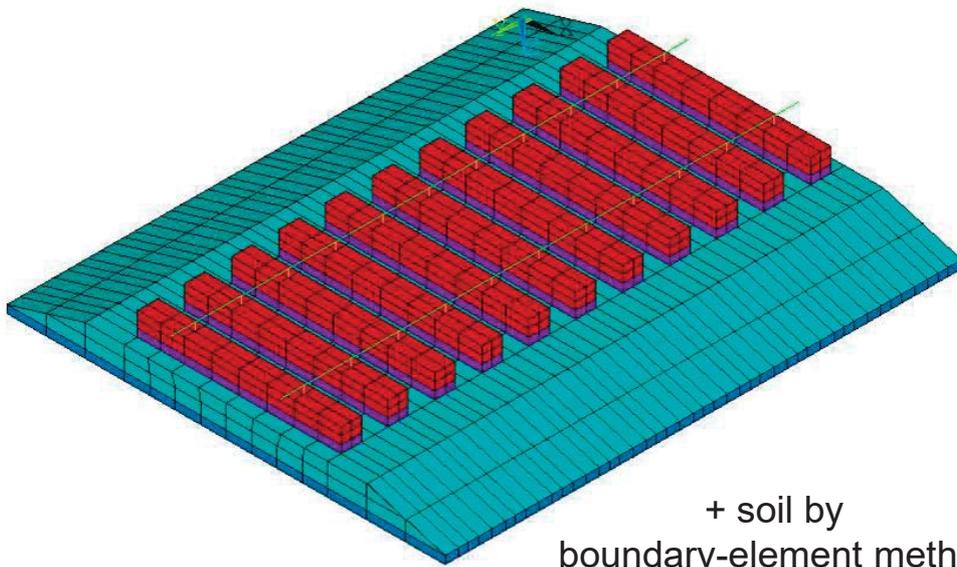
Measured
for a **stiff** soil

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



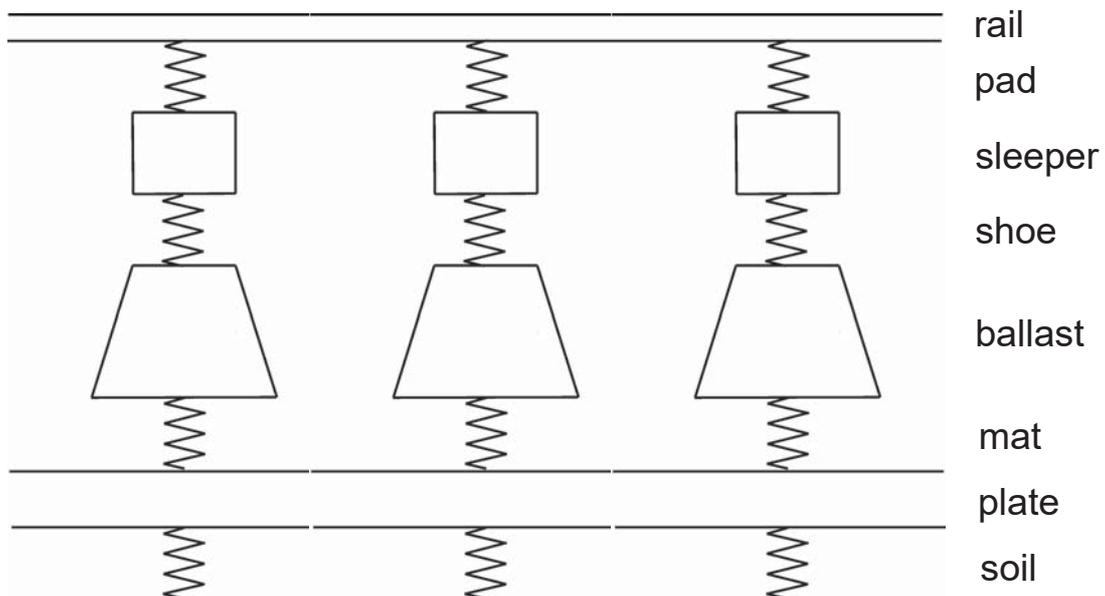
Emission

3-dimensional FE-model of ballasted track



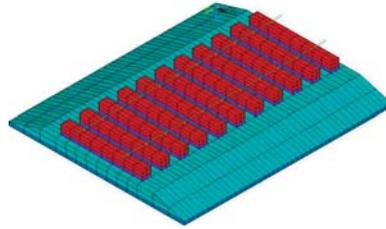
+ soil by
boundary-element method

2-dimensional beam-on-support model

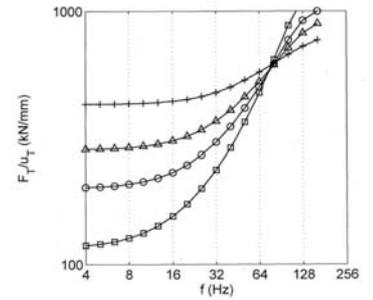
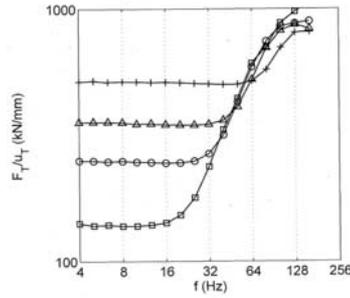
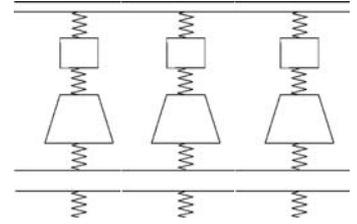


Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

3D (FEBEM)



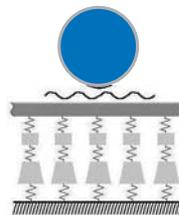
→ 2D (Winkler)



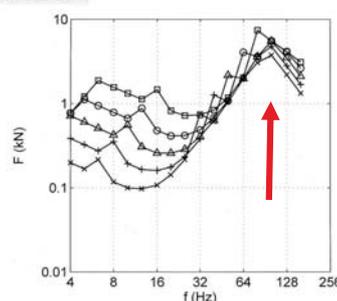
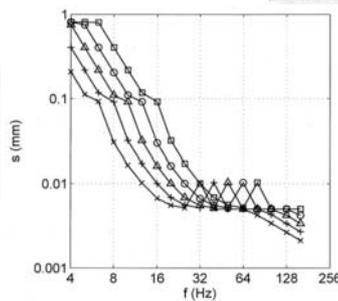
Gleisteifigkeit bei verschiedenen Böden

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Störgrößen →



→ Achslasten

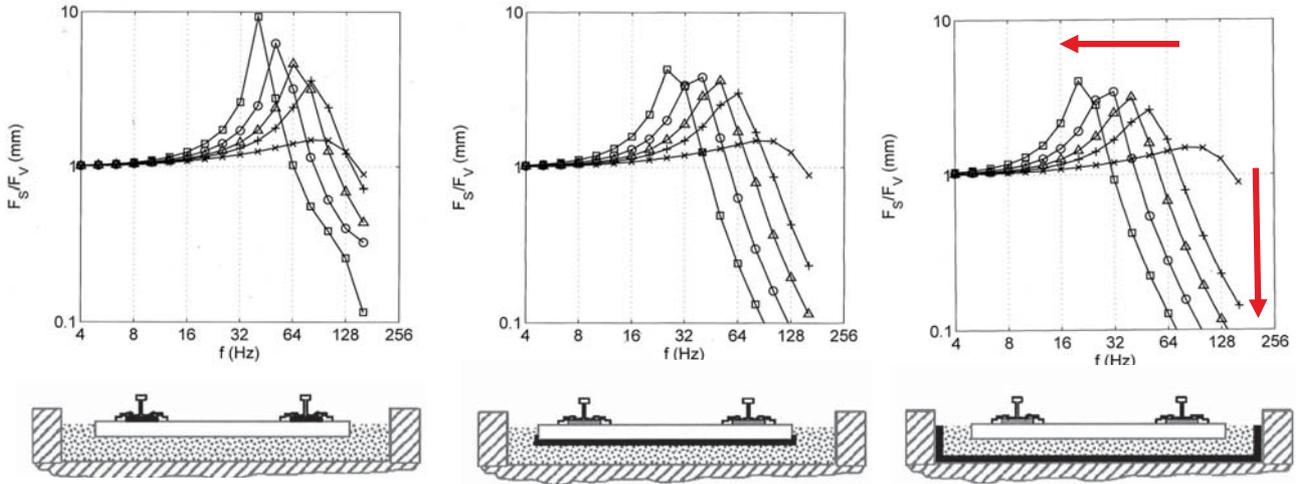


Fahrzeug-Gleis-Interaktion

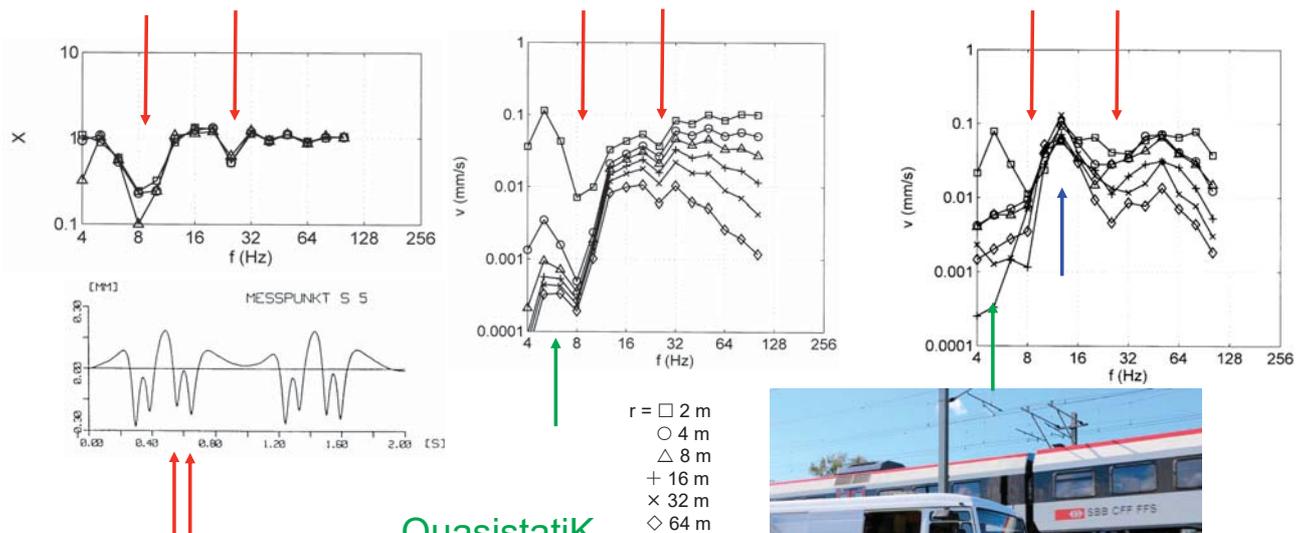
- $v_T = 160$ km/h
- $v_T = 125$ km/h
- △ $v_T = 100$ km/h
- + $v_T = 80$ km/h
- × $v_T = 63$ km/h

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Minderung der Achslasten durch elastische Schienenlager, Schwellensohlen und Unterschottermatten



Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



Achsfolge

mittelfrequente Komponente

Quasistatik

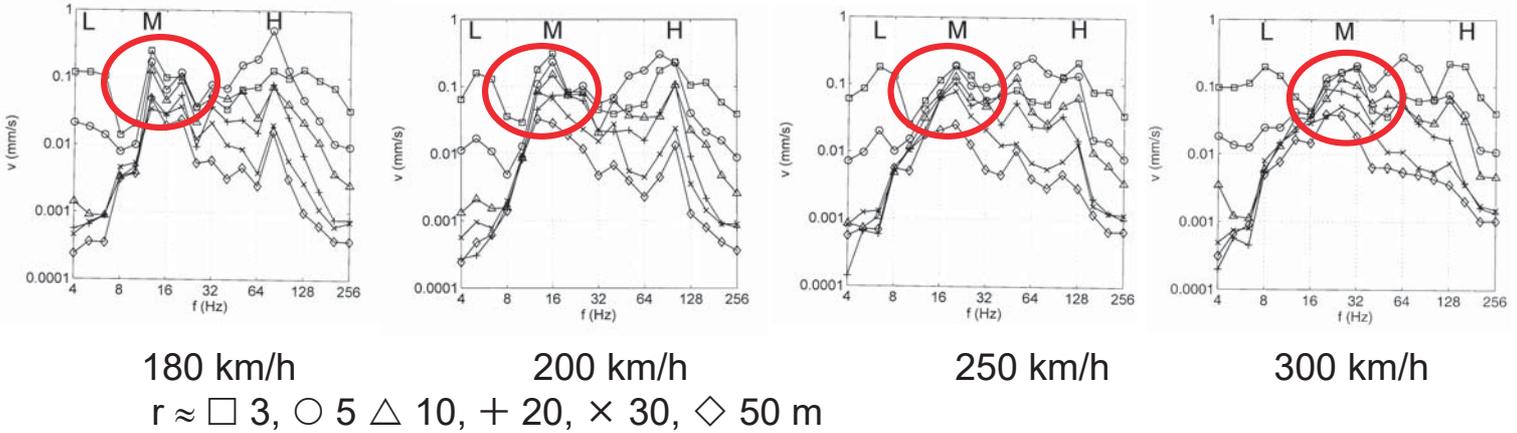
- $r = \square$ 2 m
- \circ 4 m
- \triangle 8 m
- $+$ 16 m
- \times 32 m
- \diamond 64 m



Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



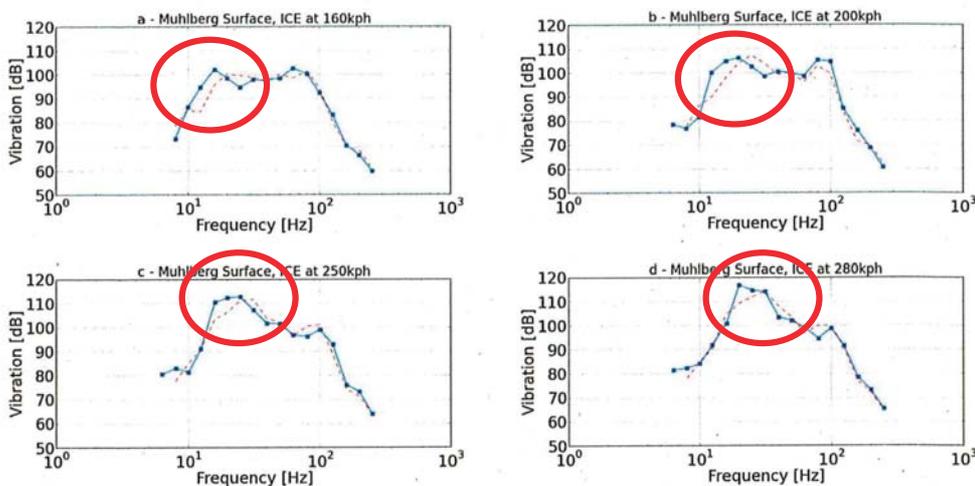
BAM



Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV21), Beijing, China, 13-17 July 2014



Highspeed 2

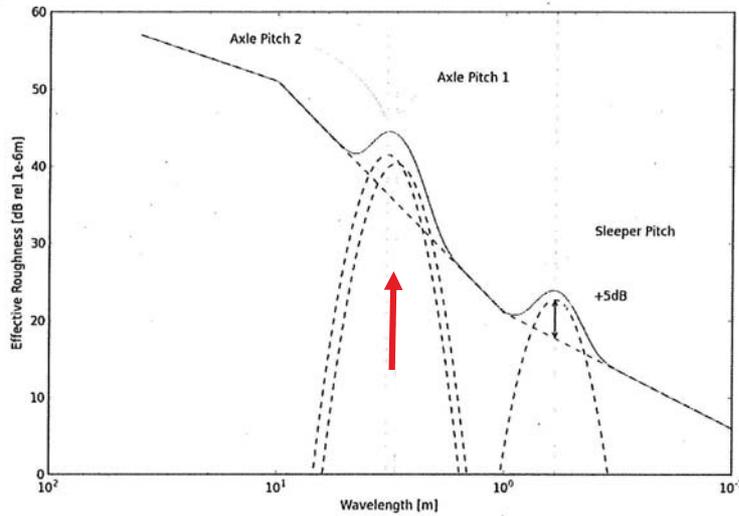


Figure 4. Comparison of measured (—■—) and predicted (---) vibration spectra at Muehlberg for various train speeds, at 8m from the nearest track.

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Störgröße

HS2 = BAM
+ mittelfrequente Komponente



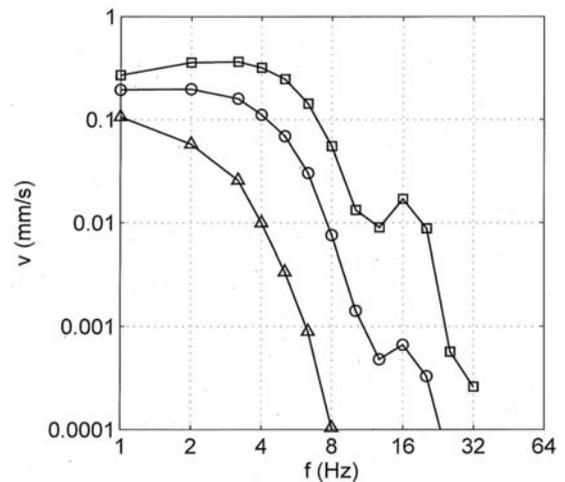
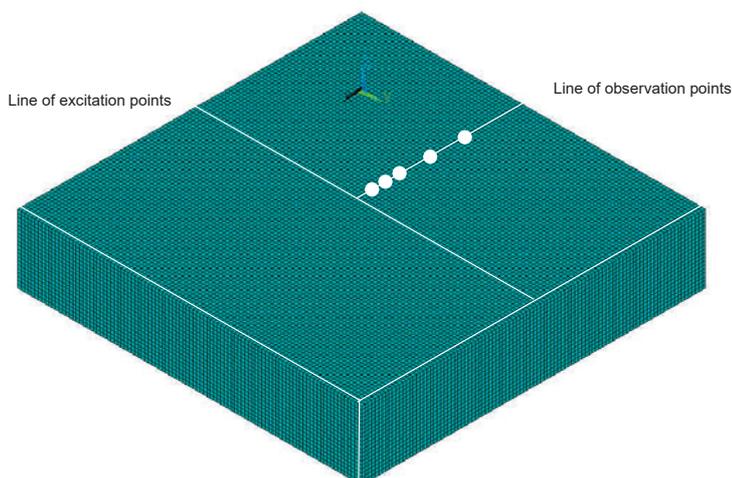
Highspeed 2



Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

regelmäßiger, homogener Boden
Quasistatik

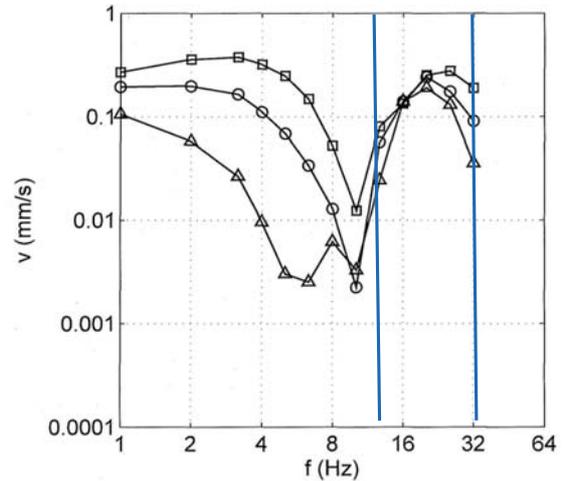
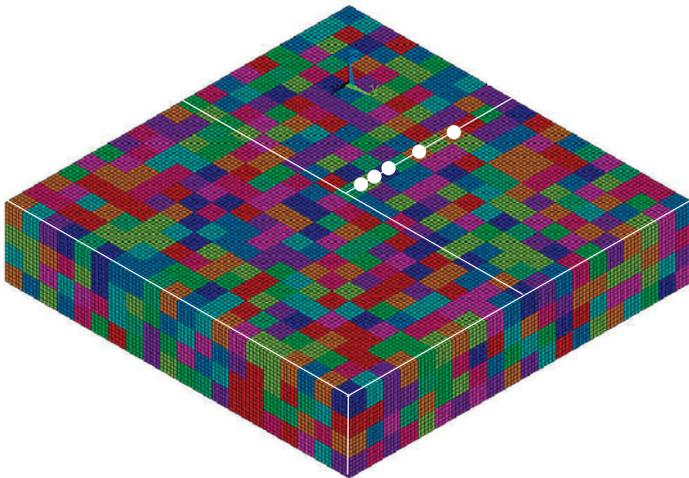
$v_T = 200 \text{ km/h}$
 $r = 3, 5, 10 \text{ m}$
 $v_S = 200 \text{ m/s}$



Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

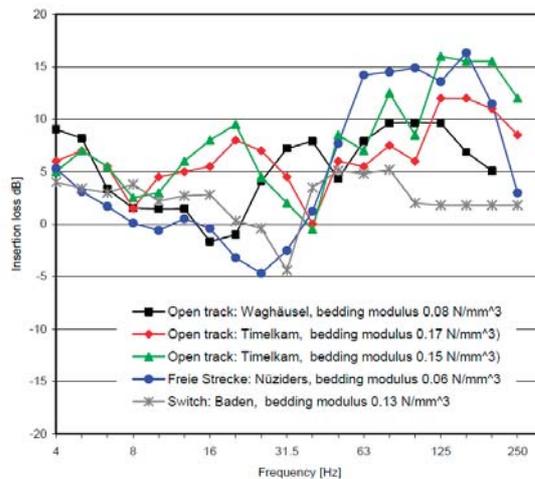
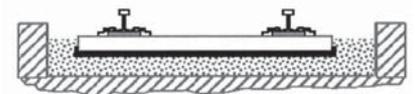
Zerstreung der Achsimpulse durch einen unregelmäßigen Boden

$v_T = 200 \text{ km/h}$
 $r = 3, 5, 10 \text{ m}$
 $v_S = 200 \text{ m/s}$



Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Einfügedämmung durch elastische Schwellensole

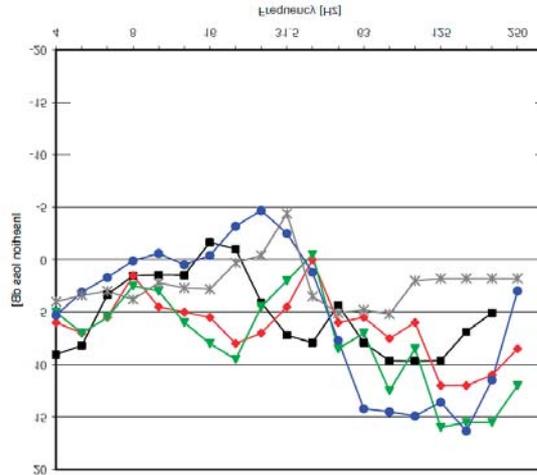
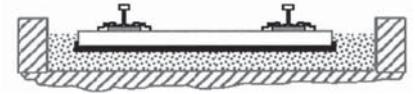


aus Stiebel, DB-Bericht, 2007

Figure 1: Considering the vibration emission, the insertion losses defined as the difference spectra of the unweighted vibration velocity level at the reference site and at the test site are plotted as a function of the static bedding modulus.

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Minderung durch elastische Schwellensohlen



aus Stiebel, DB-Bericht, 2007

← -15 dB

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Originalspektren
mit
ohne Maßnahme

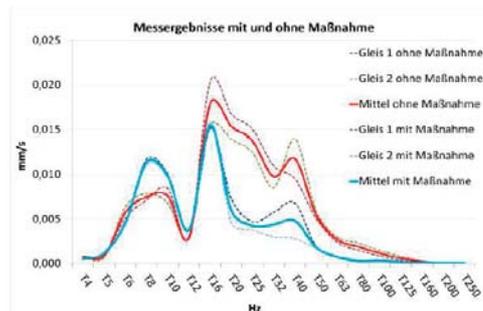
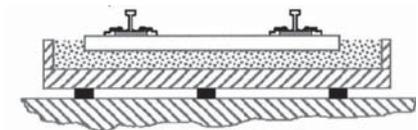
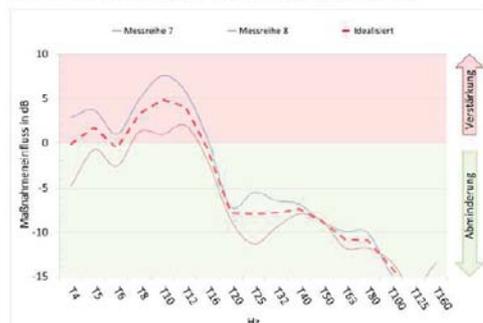


Abbildung 2-13: Messergebnisse vor und nach Einbau des Masse-Feder-Systems auf einer Holzdecke mit einer Eigenfrequenz von 8 Hz



Elastomerlager 11-14 Hz

Minderung

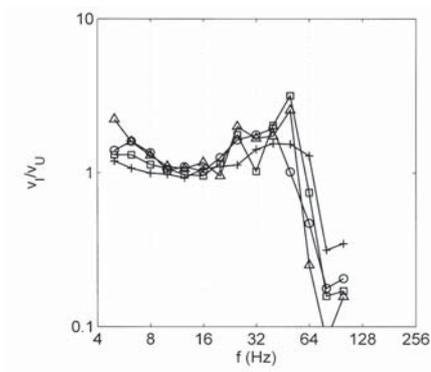
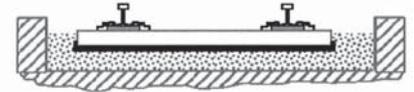


aus Tappauf, Bautechnik, 2019

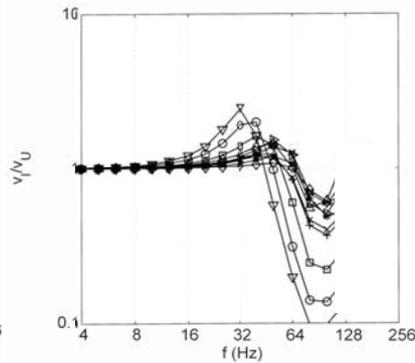
← -15 dB

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Minderung durch elastische Schwellensohlen



Schwingermessung nach Mistler, RIVAS



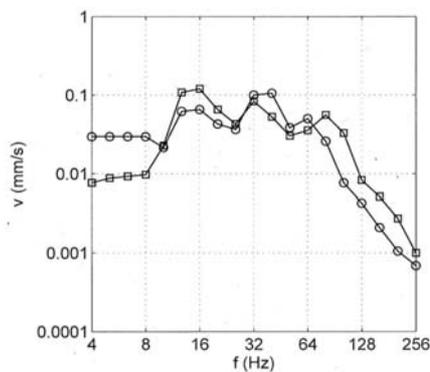
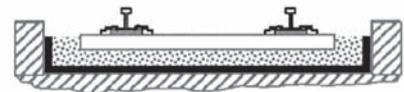
Berechnung BAM, RIVAS-Bericht, 2013



← -20 dB

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

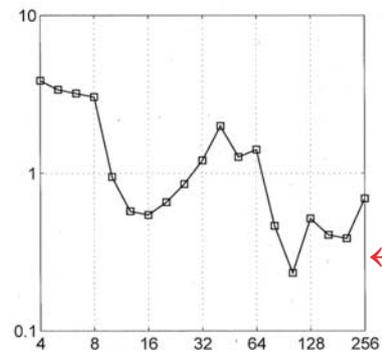
Minderung durch Unterschottermatten



Originalspektren

○ mit

□ ohne Maßnahme



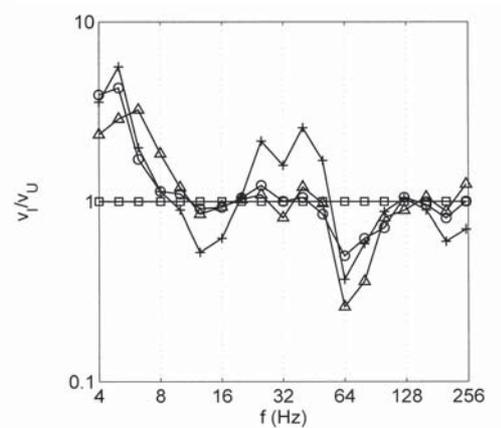
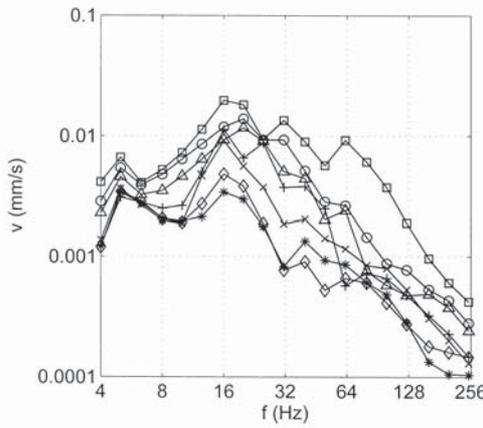
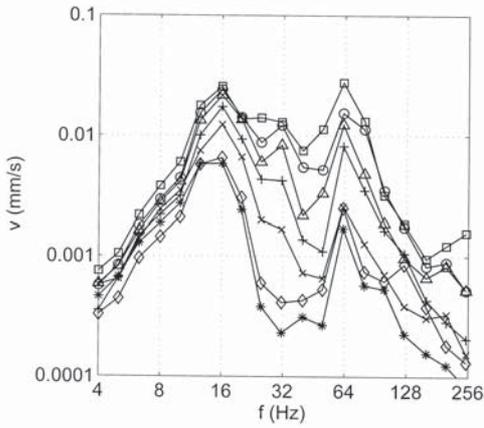
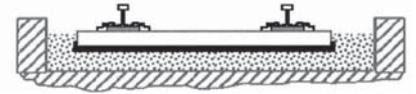
Minderung

nach Müller, SBB-Bericht, 2008

← -10 dB

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Minderung durch elastische Schwellensohlen



Originalspektren einer Messachse
ohne mit Maßnahme

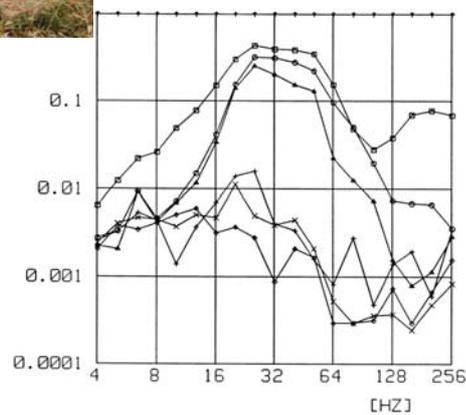
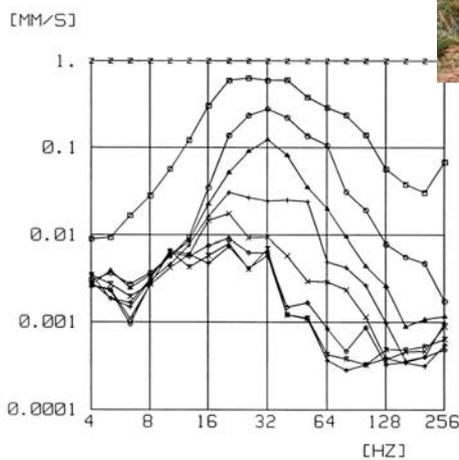
Minderung

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Bodenkennwerte Übertragungsfunktionen Messort I

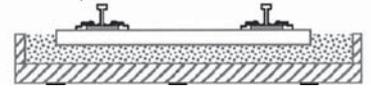


Messort II

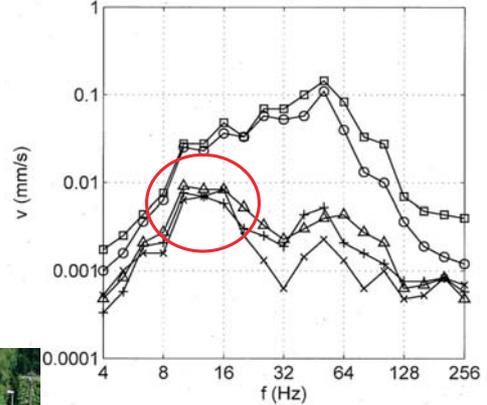
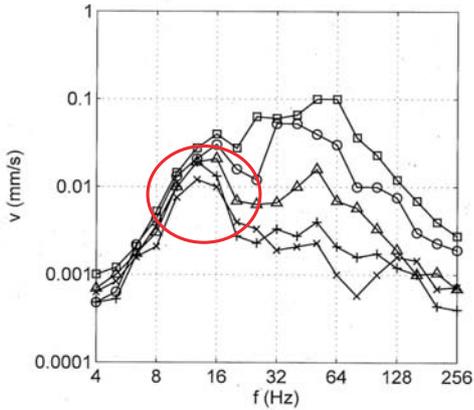


$x = 2.5 - 50 \text{ m}$

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



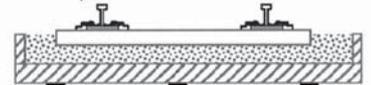
Minderung einer Unterschotterplatte



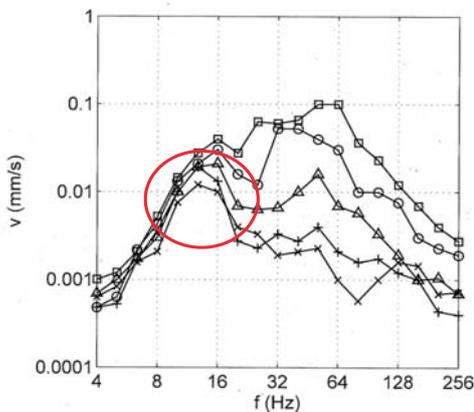
BAM 7.2

24. Symposium für Baudynamik und Erschütterungsmessungen, Zürich, 9. Juni 2023

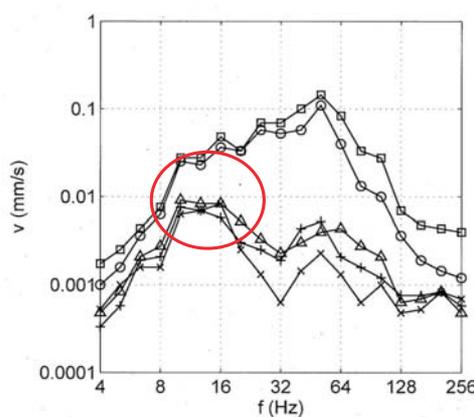
Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



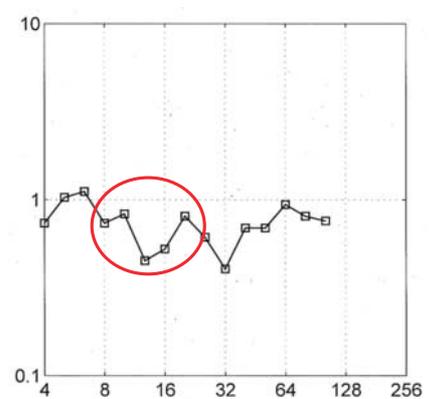
Minderung einer Unterschotterplatte



Originalspektren einer Messachse
ohne



mit Maßnahme

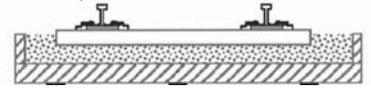


Minderung

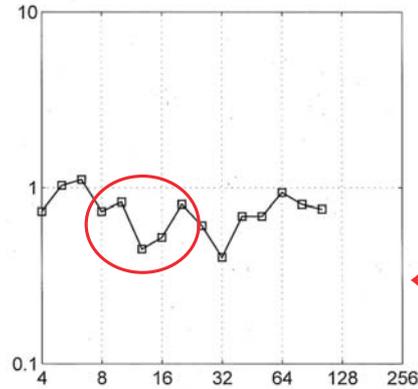
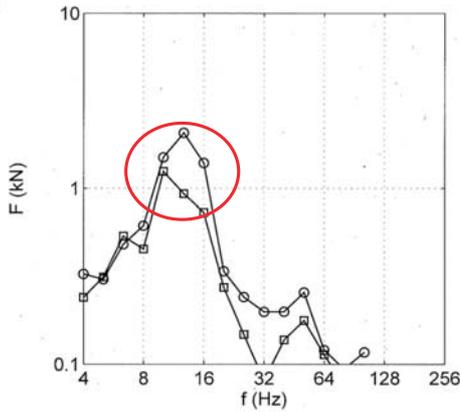
BAM 7.2

24. Symposium für Baudynamik und Erschütterungsmessungen, Zürich, 9. Juni 2023

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



Minderung einer Unterschotterplatte



Kraftspektren

□ mit

○ ohne Maßnahme

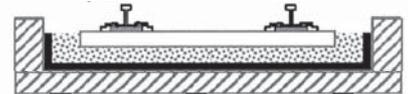
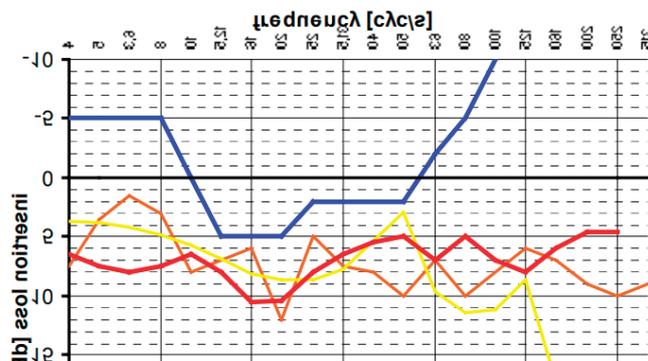
Minderung

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



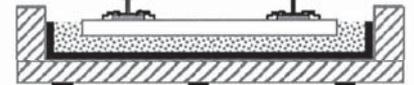
Lutz Auersch

Minderung eines Gleistroges

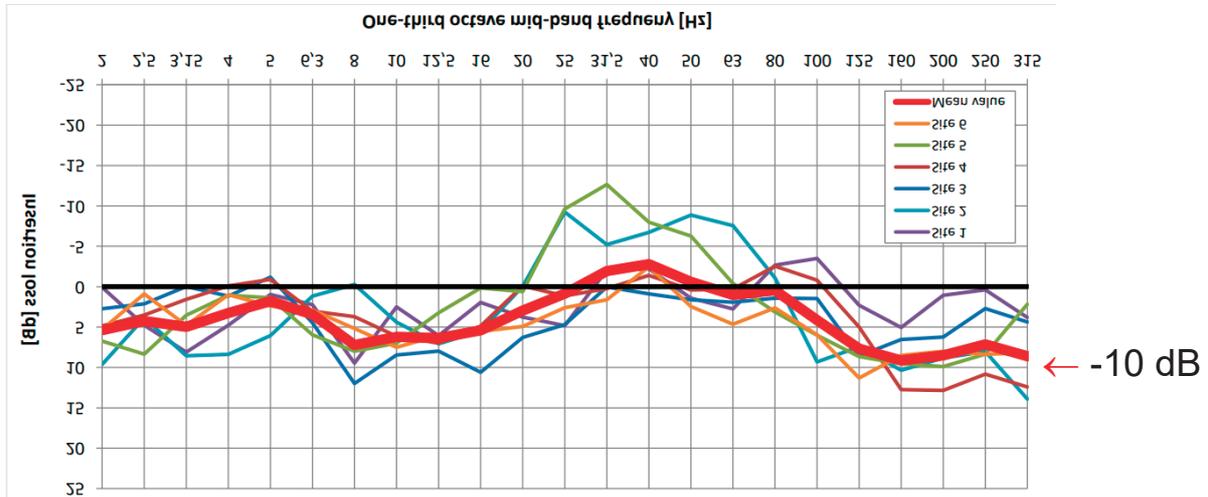


aus Rosenthal, DAGA, 2004

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

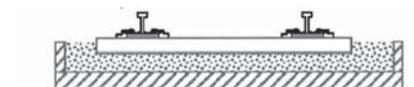


Minderung von 6 Gleiströgen

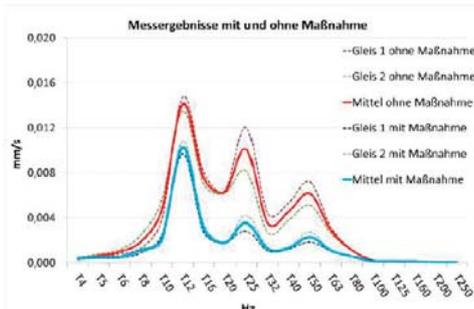


aus Mistler, IWRN, 2019

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



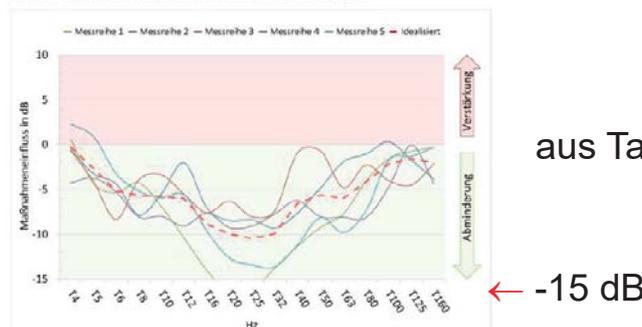
Originalspektren
mit
ohne Maßnahme



Gleistragplatte
+ „Impedanzplatte“

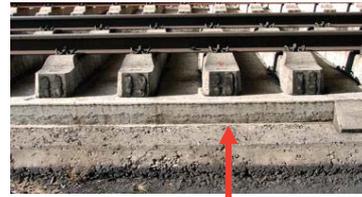
Abbildung 2-15: Messergebnisse vor und nach Durchführung der Bodenverbesserung und Einbau der massiven Gründung

Minderung



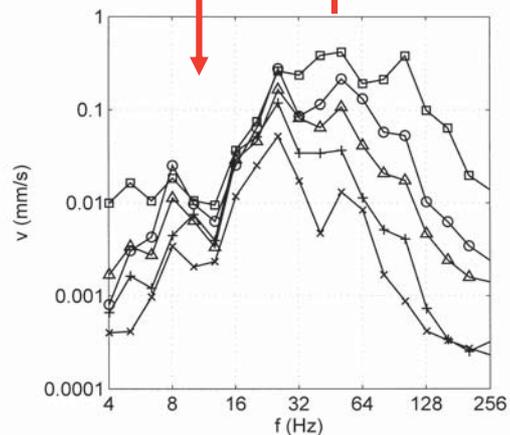
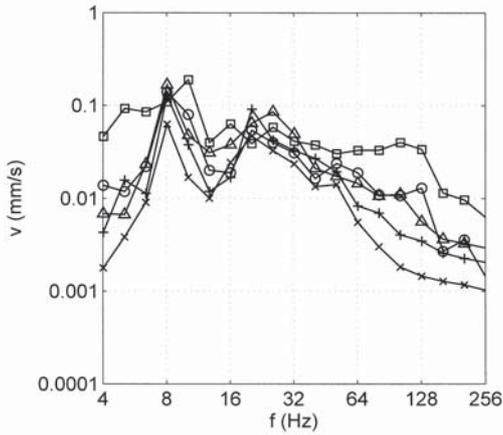
aus Tappauf, Bautechnik, 2019

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



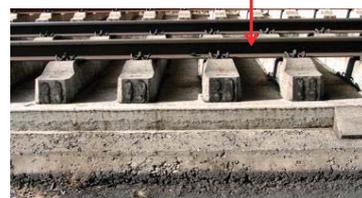
Feste
Fahrbahn

- 4 m
- 8 m
- △ 16 m
- + 32 m
- × 64 m

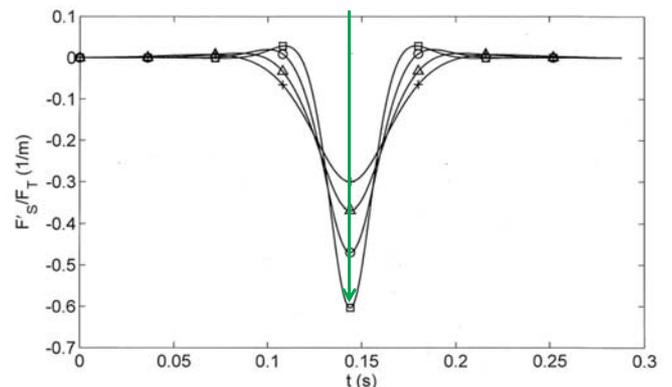
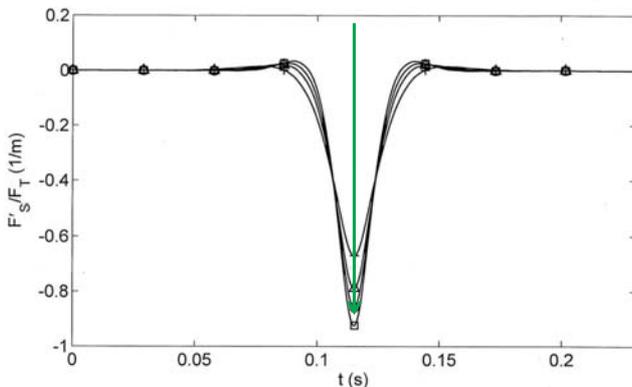


Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

F_T Achslast



Feste
Fahrbahn

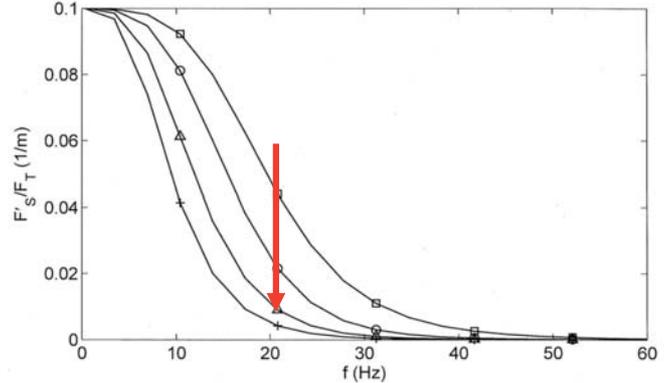
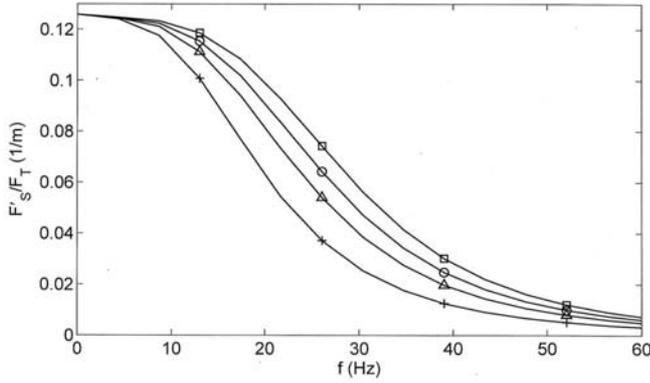


F_S Verteilung der Achslast auf den Boden

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

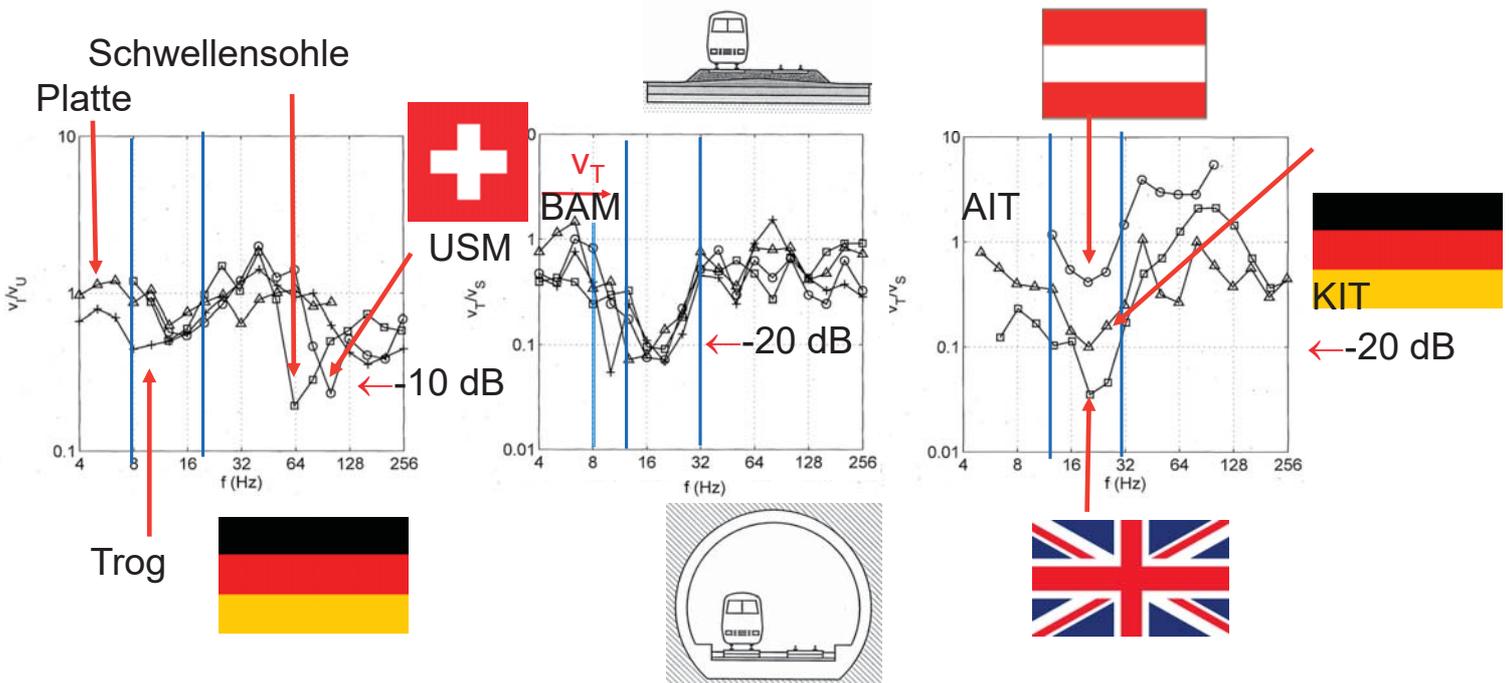


Feste
Fahrbahn



$v_S = + 100, \triangle 150, \circ 200, \square 300 \text{ m/s}$ $t_p = + 0.6, \triangle 0.45, \circ 0.3, \square 0.15 \text{ m}$

Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen



Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen

Zusammenfassung

Eine frequenz- und bodenabhängige Prognose ist einfach möglich.

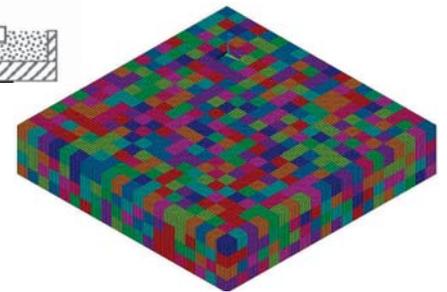
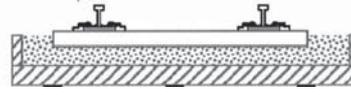
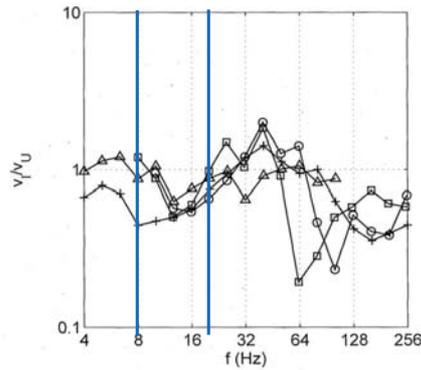
Die Kraft als Anregung.

Minderungsmaßnahmen im 2D Gleismodell.

Messung der Minderung

- mit Originalspektren
- mit Fernfeldpunkten
- mit Messachse
- mit gemessenen Bodenkennwerten
- mit Bodenkorrektur (Anregungskraft)
- mit steif gelagertem Referenzgleis

Der mittelfrequente Zerstreuteil der Achsimpulse kann prognostiziert und gemindert werden.



Frequenz- und bodenabhängige Prognose und Minderung von Bahnerschütterungen