

27. Mai 2009

Teststrecken für besohlte Eisenbahnschwellen

Kornel Köstli

SBB Infrastruktur, Umwelt

Inhalt

1. Einleitung	2
2. Schwellenbesohlungen als Erschütterungsschutz	2
3. Überprüfung einfacher Thesen zu Eisenbahnvibrationen und Schwellenbesohlungen.....	3
3.1. Die Einfügedämmung ist unabhängig vom gemessenen Vibrationsspektrum.....	3
3.2. Schwellenbesohlungen verbessern die Gleislage	4
3.3. Je weicher die Besohlung desto besser der Erschütterungsschutz	6
4. Zusammenfassung	7
Literatur	8

1. Einleitung

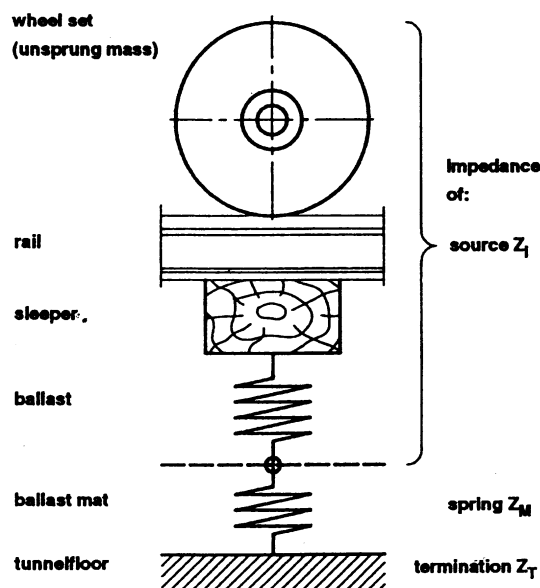
Ein fahrender Zug verursacht mechanische Schwingungen, welche über den Boden auf das Gebäudefundament und von dort über Mauern auf die Wohnräume übertragen werden. Böden und Decken werden zu Vibrationen angeregt. Spürt der Mensch ein Erzittern des Fussbodens oder der Wände, so spricht man von **Erschütterungen**.

Der Einsatz von **besohlenen Beton- und Holzschwellen** wird bei der SBB durch verschiedene Interessensbereiche gefördert. Diese Themen sowie verschiedene Einbauten wurden bereits an diesem Symposium vor zwei Jahren vorgestellt [1]. Der Beitrag vor zwei Jahren behandelte auch Fragen zum Einbau und die Problematik für den Eisenbahnbetrieb. Exemplarisch wurden diese Fragen auch in einer Publikation der SBB in der Schweizer Eisenbahn-Revue zum Einbau von besohlenen Eisenbahnschwellen in Leuk behandelt [2].

In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt beim Erschütterungsschutz (inklusive abgestrahlter Körperschall) und weniger beim Eisenbahnoberbau. Es werden drei einfache Thesen zu Erschütterungen und besohlenen Eisenbahnschwellen vorgestellt und mit Messungen der SBB verglichen.

2. Schwellenbesohlungen als Erschütterungsschutz

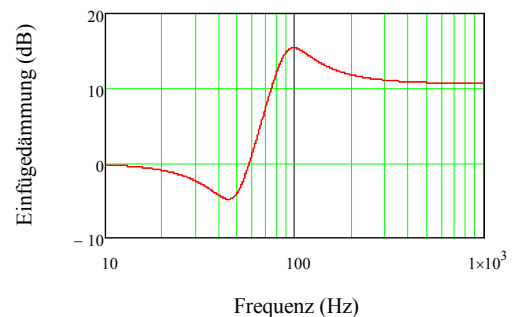
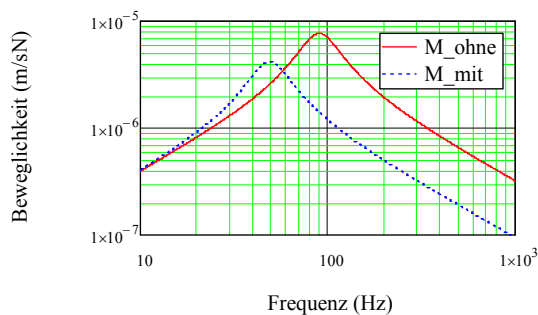
Es gibt diverse Theorien und Modelle zur Dynamik des Gleisbaues bei Zugüberfahrten [3]. Viele Modelle werden auch aktuell für den Lärm- und Erschütterungsschutz weiterentwickelt [4]. Ein einfaches Modell hat Prof. Wettschureck bereits vor über 20 Jahren für die Berechnung der Wirkung von Unterschottermatten eingeführt [5, 6]. Das Modell entspricht weitgehend der elastischen Lagerung von Fundamenten, wie man es zum Beispiel auch im Taschenbuch der technischen Akustik [7] findet.



Impedanzmodell zur Berechnung der Einfügedämmung einer Unterschottermatte nach [5]

Die Einfügedämmung ΔL_E bezeichnet dabei das Verhältnis der Amplituden im Boden ohne eingefügte Elastizität zu den Amplituden im Boden mit eingefügter Elastizität. Das Modell für Unterschottermatten kann für Schwellenbesohlungen analog verwendet werden. Ohne auf die Rechnung einzugehen sei hier der Sachverhalt kurz wiedergegeben. Aus dem Verhältnis der Transmissionsimpedanzen $Z = F / v$ (F = anregende Kraft bei der Schiene, v = Geschwindigkeitsamplitude im Boden) ohne Schwellenbesohlung zu mit Schwellenbesohlung, kann die Einfügedämmung berechnet werden [8]:

$$\Delta L_E = 20 \cdot \lg(|v_{\text{ohne}}/v_{\text{mit}}|) = 20 \cdot \lg(|Z_{\text{mit}}/Z_{\text{ohne}}|)$$



Mobilitäten $1/Z$ in m/s/N und resultierende Einfügedämmung ΔL_E in dB in Abhängigkeit der Frequenz f in Hz

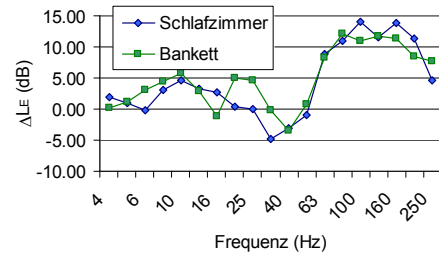
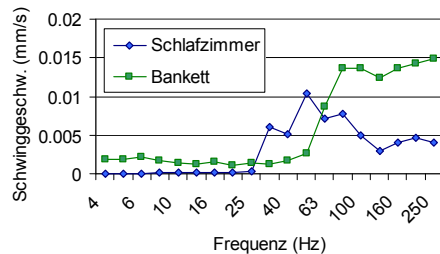
Das Modell gibt grob den aus Messungen erwarteten Verlauf von ΔL_E wieder. Die Schwierigkeit liegt nun darin, mit korrekten Eingangswerten für die Elastizitäten und Dämpfung von Oberbau, Boden und Schwellenbesohlung in diesem eindimensionalen Modell den dreidimensionalen Aufbau des Gleisrostes auf dem Boden möglichst korrekt abzubilden. Das Modell dient hier nur zur groben Orientierung. Für weitere theoretische Überlegungen wird auf die vorgängig zitierte Literatur verwiesen.

3. Überprüfung einfacher Thesen zu Eisenbahnvibrationen und Schwellenbesohlungen

3.1. Die Einfügedämmung ist unabhängig vom gemessenen Vibrationsspektrum

Das Modell, das im Kapitel 2 vorgestellt wurde, basiert darauf, dass sich die Elastizitäten bei Zugüberfahrt linear verhalten. Aus Labormessungen ist aber bekannt, dass Schienenzwischenlagen oder Schwellenbesohlungen gebogene Druck-Weg-Kennlinien aufweisen und sich entsprechend nicht linear verhalten. Trotzdem gibt das Modell einen guten ersten Hinweis auf die Einfügedämmung.

Die Frage in diesem Kapitel ist nun, ob sich auch der Boden und die Gebäude bei den gemessenen Vibrationsamplituden (genügend) linear verhalten. Ist dies der Fall, dann ist die Einfügedämmung ΔL_E unabhängig vom gemessenen Vibrationsspektrum.



Messung von Vibrationsspektren in Leuk vor dem Einbau von Schwellenbesohlungen

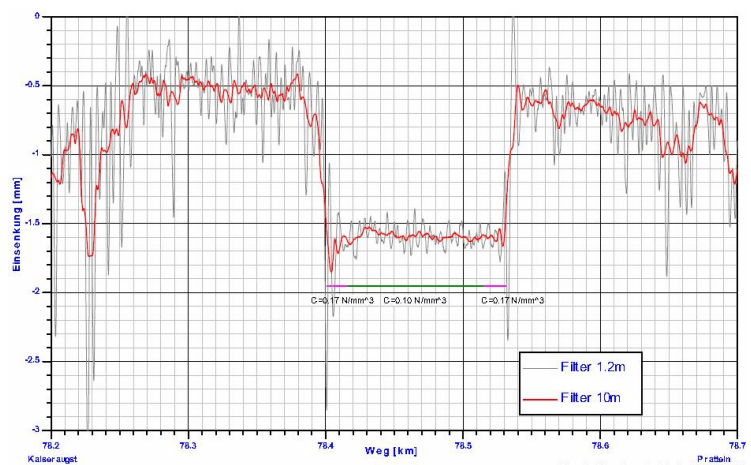
Gemessene Einfügedämmungen von Schwellenbesohlungen ΔL_E in Leuk ($C_{nominal} = 0.1 \text{ N/mm}^3$) nach [9, 10]

Der Vergleich von Vibrationsspektren und Einfügedämmung zeigt, dass – zumindest in Leuk – sich Boden und Gebäude linear verhalten. Die Einfügedämmung ist auf dem Bankett neben dem Gleis im Tunnel gleich gross wie im sich darüber befindenden Gebäude und ist damit weitgehend unabhängig vom Vibrationsspektrum.

Damit ist die Grundlage gegeben für lineare oder semiempirische Modelle für die Ausbreitungsprognose wie zum Beispiel Vibra 2.

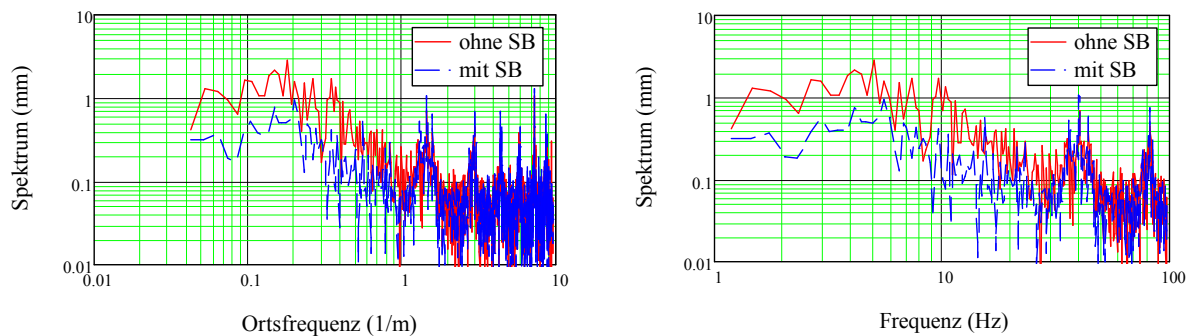
3.2. Schwellenbesohlungen verbessern die Gleislage

Diese Behauptung und auch dass Schwellenbesohlungen die Stabilität der Gleislage verbessern ist weitverbreitet. Hier soll auch der Einfluss der verbesserten Gleislage auf die Erschütterungsemissionen gezeigt werden.



Kontinuierliche Einsenkungsmessung des Gleises bei Pratteln unter einer Achslast von 20t nach [11]

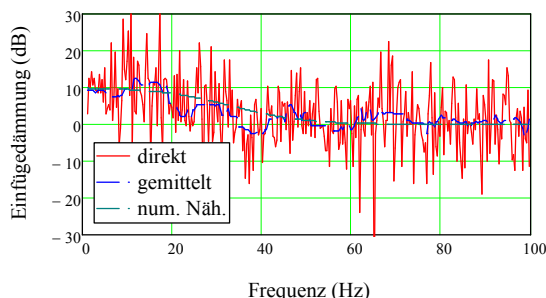
Nach dem Einbau von beschlten Schwellen ($C_{\text{nominal}} = 0.1 \text{ N/mm}^3$) wurde in Pratteln die Ein-senkung des Gleises unter einer Achslast von 20 t gemessen. Die Schwellenbeschlung ist im Messdiagramm gut an der zusätzlichen Einsenkung von ca. 1 mm erkennbar. Neben dem beschlten Gleis (links, km 78.3 bis 78.4) wurde der Oberbau wie beim beschlten Gleis neu in Stand gestellt. Trotzdem ist die Einsenkkurve unruhiger als beim Abschnitt mit Schwellenbeschlung. Dies zeigt sich auch bei der Spektralzerlegung mittels Fouriertransformation:



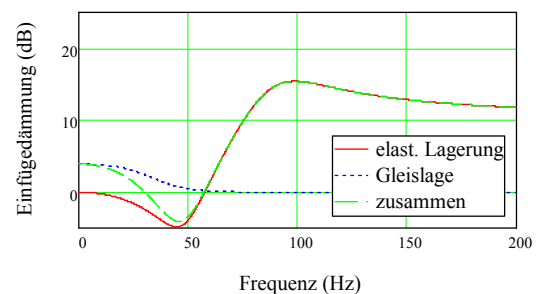
Spektralzerlegung der kontinuierlichen Einsenkkurve unter 20 t Achslast für den Bereich mit Schwellenbeschlung (SB) und ohne SB: Die Ortsfrequenz (1/m) wurde in eine Zeitfrequenz umgerechnet für eine Zuggeschwindigkeit von 100 km/h.

Das erste Diagramm zeigt die Spektren für beschlnte Strecke (mit SB) und Referenz (ohne SB) in Abhängigkeit der Ortsfrequenz. Die Umrechnung für das zweite Diagramm in die Zeitfrequenz wurde gemäss $f_{\text{Zeit}} = f_{\text{Ort}} \cdot v_{\text{Zug}}$ mit $v_{\text{Zug}} = 100 \text{ km/h}$ durchgeführt.

Bei beiden Spektren ist die Schwellenfachfrequenz gut erkennbar ($f_{\text{Ort}} = 1/0.6 \text{ /m} = 1.67 \text{ /m}$ und $f_{\text{Zeit}} = 1.67 \cdot 100/3.6 \text{ Hz} = 46 \text{ Hz}$). Oberhalb der Schwellenfachfrequenz sind die beiden Kurven gleich. Dies ist das Rauschen der Messung / des Messwagens. Unterhalb der Schwellenfachfrequenz ist jedoch ein klarer Unterschied erkennbar. Aus den Spektren $Y(f)$ kann man gemäss $\Delta L_E = 20 \cdot \lg(|Y_{\text{ohne}}/Y_{\text{mit}}|)$ die Einfügedämmung in dB auf Grund der besseren Gleislage berechnen:

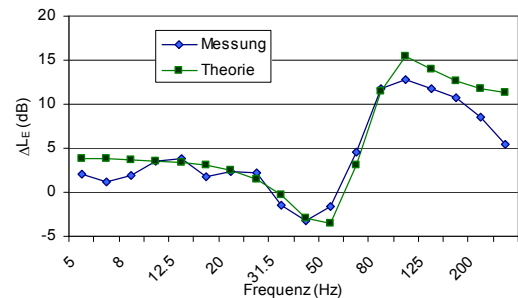
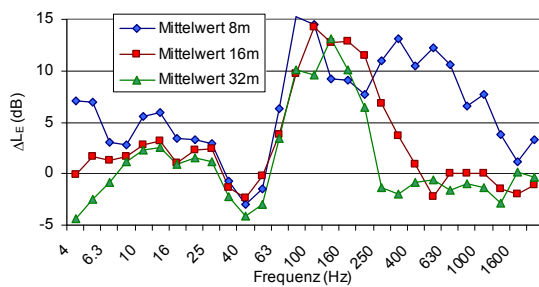


Einfügedämmung $\Delta L_E(f)$ für Schwellenbeschlungen in Pratteln abgeleitet aus den Einsenkspektren für eine Zuggeschwindigkeit von 100 km/h



Theoretische Einfügedämmung $\Delta L_E(f)$ aus besserer Gleislage (nebenan) zusammen mit elastischer Lagerung gemäss Theorie ($m_{\text{unabgef.proStützpunkt}} = 500 \text{ kg}$, $C_{\text{Boden}} = 0.33 \text{ N/mm}^3 \cdot (1+0.5j)$)

Die Einfügedämmung aus der besseren Gleislage beträgt gemäss Einsenkmessung für tiefe Frequenzen im Mittel 10 dB. Diese werden sich aber nur insofern auf die Erschütterungsmessungen auswirken, wie auch die unruhige Gleiseinsenkung für die Erschütterungsemission verantwortlich ist. Entsprechend ist für die Gesamteinfügedämmung die Dämmung durch die Gleislage im Bild rechts auf maximal 4 dB reduziert worden. Weitere Erschütterungsquellen sind Unrundheiten am Rad sowie Gleislagefehler, die nicht durch den Einsenkmesswagen gemessen werden (Der Einsenkmesswagen misst nur die Differenz 20t zu sehr wenig Last gemäss Referenzwagen auf vorangegangenem Photo.).

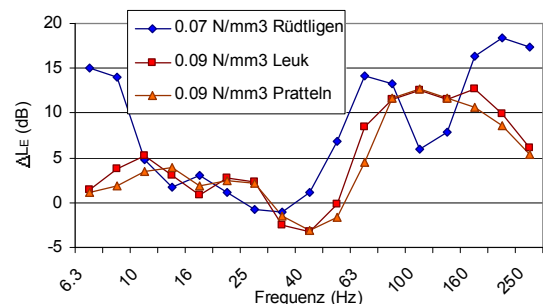
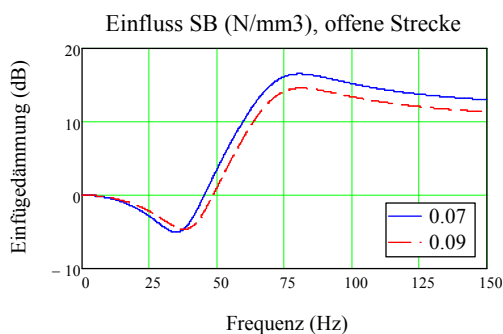


Links: Gemessene Einfügedämmung $\Delta L_E(f)$ von Schwellenbesohlungen in Pratteln [11] für verschiedene Gleisabstände. Rechts: Mittlere Einfügedämmung $\Delta L_E(f)$ verglichen mit der Theorie gemäss vorangegangenem Diagramm

Der Vergleich von erwarteter Einfügedämmung (aus elastischer Lagerung und gemessener verbesserter Gleislage) mit den Erschütterungsmessungen zeigt eindrücklich, wie gut die Einfügedämmung bei tiefen Frequenzen mit der besseren Gleislage erklärt werden kann.

3.3. Je weicher die Besohlung desto besser der Erschütterungsschutz

Die Theorie der elastischen Maschinenlagerung (siehe Kap. 1) lässt erwarten: je elastischer die Schwellenbesohlung, desto besser ist der Erschütterungsschutz.



Vergleich von gemessenen und theoretisch erwarteten Einfügedämmungen $\Delta L_E(f)$ für verschieden elastische Schwellenbesohlungen (Bettungsmodul C in N/mm³ nach Zimmermann aus den Einsenkmessungen berechnet) auf offener Strecke (Leuk im Tunnelportalbereich; Messungen aus [10 - 12])

Die gemessenen Einfügedämmungen zeigen, dass auf verschiedenen Strecken die gleiche Schwellenbesohlung sehr ähnliche Einfügedämmungen generiert (Leuk und Pratteln). Die etwas weichere Besohlung bei Rüdtligen erzeugt in der Tendenz eine bessere Einfügedämmung. Die Theorie wird damit grundsätzlich bestätigt.

Bei allen Messungen ist auch der Effekt der verbesserten oder ruhigeren Gleislage bei tiefen Frequenzen unterhalb 40 Hz erkennbar.

Es gibt aber auch andere Effekte, die eine wichtige Rolle für den Erschütterungsschutz bilden. Zum Beispiel ist in Rüdtligen ein Einbruch der Dämmung bei ca. 100 Hz erkennbar. Dies ist typisch für weichere Schienenzwischenlagen, wie sie in Rüdtligen tatsächlich auch eingesetzt wurden. Um diesen Effekt theoretisch zu zeigen, muss allerdings das eingangs erwähnte Modell um eine gedämpfte Feder zwischen Schiene und Schwelle erweitert werden.

4. Zusammenfassung

Der Beitrag stellt drei Thesen zu Erschütterungen und besohlenen Eisenbahnschwellen zur Diskussion. Der Vergleich mit Messungen auf Strecken der SBB mit und ohne besohlte Schwellen ergibt folgende Resultate:

1. Durch den Zug verursachte Vibrationen im Boden verhalten sich zwischen Tunnelbankett neben dem Zug und sich darüber befindenden Gebäuden weitgehend linear.
2. Das Gleis liegt bei besohlttem Schwellengleis ruhiger als beim gewöhnlichen Gleis. Dies kann die Erschütterungsminderung beim Einsatz von Schwellenbesohlungen bei tiefen Frequenzen unterhalb 40 Hz erklären.
3. Eine bessere Wirkung gegen Erschütterung von weichen Besohlungen konnte in der Tendenz mit Messungen bestätigt werden. Die Einfügedämmung ist aber nicht nur von der Elastizität der Besohlung abhängig.

Literatur

- [1] SBB Infrastruktur, Kornel Köstli: „Schwellenbesohlungen zur Reduktion von Körperschall-Immissionen“, 10. Symposium: Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, Dübendorf, 23. Mai 2007
- [2] Publikation der SBB in der Schweizer Eisenbahn-Revue: „Elastische Lagerung von Schwellen gegen Bahnerschütterungen – ein Pilotversuch in Leuk“, Ausgabe 4/2007, S. 174-176
- [3] Klaus Knothe: „Gleisdynamik“, Ernst & Sohn, 2001 (Das Buch ist vergriffen.)
- [4] David Thompson: „Railway Noise and Vibration“, Elsevier Ltd. 2009
- [5] Rüdiger Wettschureck: „Measures to reduce structure-borne noise emissions induced by above-ground, open railway lines“, Rail Engineering International, Edition 1997 number 1, pages 12-16
- [6] R. Wettschureck und U.J. Kurze: „Einfügungsdämmass von Unterschottermatten“, Acustica, Vol. 58, 1985
- [7] Gerhard Müller Michael Möser: „Taschenbuch der technischen Akustik“, Springer Verlag, 2004, (3. Auflage: Vergleiche pp. 314 und 545)
- [8] Mechanische Impedanzen werden z.Bsp. im Kapitel 10 „Mechanical Impedance“ von Elmer L. Hixson im Buch „Shock & Vibration Handbook“, second edition edited by Cyril M. Harris & Charels E. Crede 1976, eingeführt.
- [9] Interner Bericht SBB Messtechnik: „Erschütterungsmessungen Leuk“ Bern, 07.02.2007
- [10] Ziegler Consultants, Messbericht zu Erschütterungsmessungen in Leuk, Zürich, 17.09.2006
- [11] Interner Bericht SBB Messtechnik: „Fahrbahndynamische Messungen Pratteln 2006/2007“, Bern, 29.08.2008
- [12] Rutishauser Ingenieure: „Schwellenbesohlung, Bestimmung des Einfügedämm-Masses, Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist“, im Auftrag der DB AG / UIC, 23.01.07