

Quantifizierung des Einflusses des Rauheitsspektrums auf das Beschleunigungsdichtespektrum der Schiene bei Zugüberfahrt

Ina Richter, Katja Stampka, Ennes Sarradj

TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik, Einsteinufer 25, 10587 Berlin, i.richter@campus.tu-berlin.de

Einleitung

Ein wesentlicher Anregungsmechanismus von Rollgeräuschen an Schienenfahrzeugen ist die Rauheit der Schienenoberfläche bzw. der Radlaufläche. Beim Überfahren kommt es im nichtlinearen Kontakt durch die Rauheiten zur Schwingungsanregung sowohl des Rades als auch der Schiene. Der Beitrag der Schiene zum Gesamtrollgeräusch wird dabei wesentlich durch die Stärke des Beschleunigungsdichtespektrums (BDS) der Schiene bestimmt.

In diesem Beitrag wird der Einfluss der Schienenrauheit auf das Beschleunigungsdichtespektrum der Schiene während einer Zugüberfahrt untersucht, um den Einfluss des nichtlinearen Hertzschen Kontaktes aufzuzeigen. Es wird das Modell von Nordborg im Zeitbereich, welches in [1], [2],[3] und [4] beschrieben wird, für eine Parameterstudie verwendet. Diskutiert wird der Einfluss des Pegels des Rauheitsspektrums in Kombination mit der Zuggeschwindigkeit auf das BDS der Schiene.

Modellannahmen und untersuchte Rauheitsprofile

Für die Untersuchungen wurde ein Rad-Schiene-Kontakt-Modell im Zeitbereich verwendet. Im Modell werden ausschließlich vertikale Kräfte betrachtet. Diese werden sowohl durch parametrische Anregung als auch durch die effektive Rauheit von Rad und Schiene in der Kontaktfläche geprägt. Da im Kontakt Rauheiten von sehr kleiner Wellenlänge von der Größenordnung des Kontaktgebietes oder kleiner vom rollenden Rad „nicht gesehen“ werden, haben sie nur schwachen bis keinen Einfluss auf die Auslenkung von Rad und Schiene. Um diesen Effekt zu modellieren, wurde in der Simulation ein Remington-Filter [5] eingesetzt.

Einen Standard für die Rauheit bei Schienen liefert die TSI [6]. Dort ist die Kurve des oberen Grenzwerts für die akustische Schienenfahrflächenrauigkeit festgelegt. Der Rauheitspegel wird in dB mit dem Bezugswert von 1 μm angegeben. Wellenlängen, die geringere Höhen aufweisen, sind im Spektrum entsprechend negativ. Die in diesem Beitrag untersuchten Rauheitsprofile sind teils hypothetischer Natur, um den Einfluss der Rauheit auf das BDS systematisch zu analysieren und teils bilden sie reale effektive Rauheiten ab.

Zur systematischen Analyse wurden ein mit $1/\lambda$ abfallendes sowie ein konstantes Spektrum als Rauheitsanregung gewählt. Im ersten Schritt wurde das konstante Spektrum für den gesamten interessierenden Frequenzbereich auf -20 dB Rauheitspegel gesetzt und mit Peaks von 30 dB für unterschiedliche Wellenlängen λ manipuliert,

wobei -20 dB einem Höhenprofil von 0,1 μm pro Terzmitwellenlänge entspricht und sich für 30 dB in etwa eine Rauheit von 4,64 μm für die entsprechend manipulierte Wellenlänge ergeben. In Abbildung 1 ist dieser Rauheitspegel für eine verstärkte Anregung bei $\lambda = 10$ cm dargestellt. Je nach Geschwindigkeit des Zuges V führen diese Wellenlängen bei unterschiedlichen Frequenzen f zur Anregung. Es gilt: $f = V/\lambda$.

Des Weiteren wurde ein mit $1/\lambda$ abfallendes Rauheitsspektrum mit unterschiedlich starken Rauheitspegeln generiert. Beispielhaft zeigt dies Abbildung 2. Rauheitsprofile realistischerer Natur mit unterschiedlich ausgeprägtem Höhenprofil zeigt Abbildung 3. Die Daten hierfür sind [7] entnommen. Die orangene Linie zeigt einen effektiven Rauheitspegel von einer Schienenfahrfläche guter Qualität in Kombination mit Rädern mit Graugussbremsklötzen. Die rote Linie gehört zu einem Gleis, bei dem sich auf Grund vieler Zugüberfahrten bereits charakteristische Riffelgebildet haben.

Das zur grünen Kurve gehörige Gleis befindet sich in einem Zustand zwischen den Gleisen mit orangener und dem roten Kurve. Die violette Linie zeigt ein stark geriffeltes Profil. In der Abbildung ist außerdem gut zu erkennen, dass das Rauheitsprofil eines Rades mit Bremsklötzen charakteristischerweise von einer Wellenlänge von 5 cm dominiert wird [7]. Es fällt auf, dass alle Kurven über der TSI Grenzkurve liegen. Dies kann auf eben jene Bremsklötze zurückgeführt werden. Von Klötzen gebremste und somit rauhere Räder erzeugen je nach Zuggeschwindigkeit bis zu 10 dB lautere Rollgeräusche als anders gebremste Räder (bezogen auf den A-bewerteten Schalldruckpegel in 25 m Entfernung) [7].

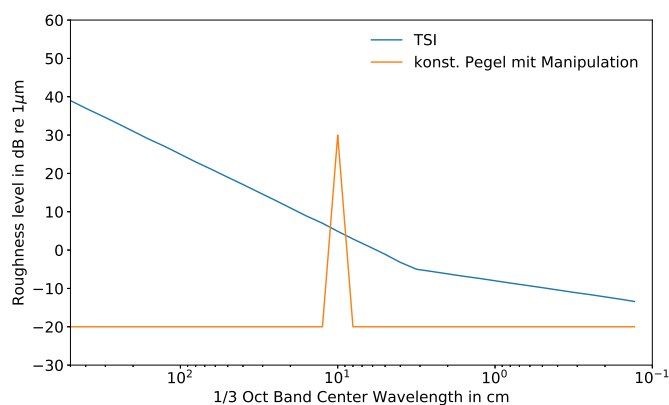


Abbildung 1: konstanter Rauheitspegel bei -20 dB mit Manipulation von 30 dB hier beispielhaft bei einer Wellenlänge von 10 cm im Vergleich mit der Grenzkurve des TSI

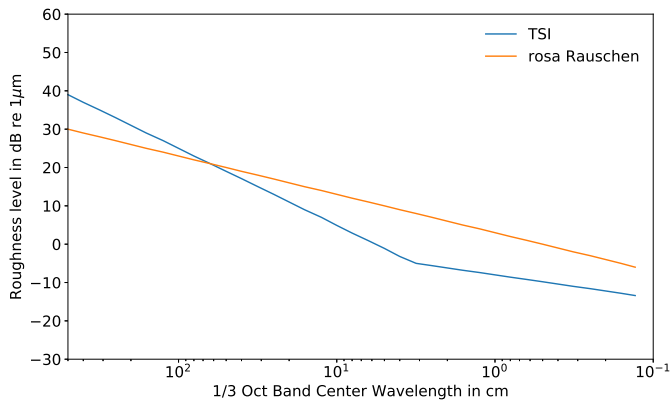


Abbildung 2: Rosa Rauschen als Rauheitspegel im Vergleich mit der Grenzkurve des TSI

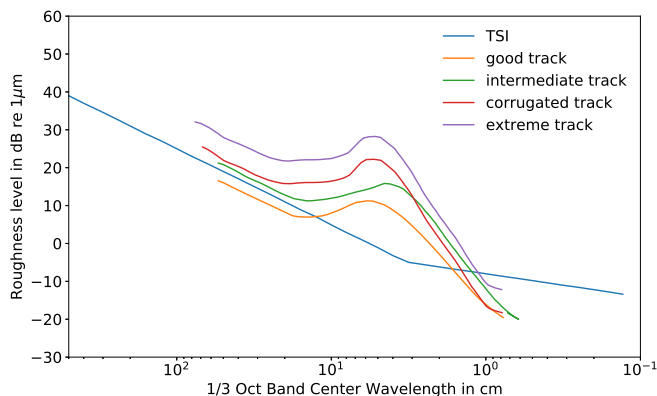


Abbildung 3: Verschiedene Gleise mit unterschiedlichen Rauheitspegeln mit Remingtonfilter im Vergleich mit der Grenzkurve des TSI (Daten entnommen aus [7])

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse für die oben genannten unterschiedlichen Rauheitsprofile (Abbildungen 1 - 3) vorgestellt. Um Aussagen über das Schwingverhalten der Schiene treffen zu können, wurde das BDS als Größe zur Auswertung der Ergebnisse gewählt. Die in der Simulation verwendeten Parameter für Gleis und Rad sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Da Simulationen mit dem Modell zuverlässige Aussagen über das Schwingverhalten der Schiene im Frequenzbereich 20 Hz-2000 Hz zulassen, beschränken sich die Ergebnisse auf diesen Frequenzbereich.

Zunächst wurde das BDS für eine im Vergleich zur TSI-Grenzkurve sehr niedrig gewählte konstante Anregung berechnet. Die Abbildungen 4 - 6 zeigen das BDS für diese konstante Anregung im Vergleich zu Beschleunigungsdichtespektren mit Manipulationen dieser konstanten Anregung. Die Geschwindigkeit der Zugüberfahrt beträgt 160 km/h. Abbildung 4 zeigt das BDS für Peaks bei sehr großen bzw. kleinen Wellenlängen. In Abbildung 5 sind Beschleunigungsdichtespektren bei mittelfrequenten Anregungen dargestellt und Abbildung 6 zeigt Anregungen in der Größenordnung der pinned-pinned-Frequenz ($f_{pp} = 1111 Hz$).

Um die Änderung des BDS auf Grund einer

Tabelle 1: Parameter für die Simulationen

E-Modul E	Dichte ρ	Verlustfaktor der Schiene η_r	längenbezogene Masse der Schiene m'	Flächenträgheitsmoment I
$210 \cdot 10^9 N/m^2$	$7850 kg/m^3$	0,01	$60,34 kg/m$	$30,83 \cdot 10^{-6} m^4$
Schwellenabstand l	Steifigkeit der Gleiszweischichtenlagen K_p	Verlustfaktor der Gleiszweischichtenlagen η_p	halbe Schwellenmasse M_s	Steifigkeit des Schotters K_b
0,6 m	$350 \cdot 10^6 N/m$	0,25	162 kg	$50 \cdot 10^6 N/m$
Verlustfaktor des Schotters η_b	Masse des Rades M_w	Durchmesser des Rades d_w	Vorlast des Zuges P	
1,0	600 kg	0,92 m	85 kN	

Rauheitsänderung im gesamten relevanten Wellenlängenbereich zu quantifizieren, zeigt Abbildung 7 die BDS für die Variation des rosa Rauschens in einem Bereich von 18 dB. Die Zuggeschwindigkeit wurde hier mit 140 km/h simuliert.

Um auch Aussagen über das Schwingverhalten der Schiene bei Zugüberfahrt von realeren Rauheitsprofilen treffen zu können, wurden in Abbildung 8 Simulationen des BDS für verschiedene Geschwindigkeiten für die vier verschiedenen realen Schienenprofile aus Abbildung 3 zusammengefasst.

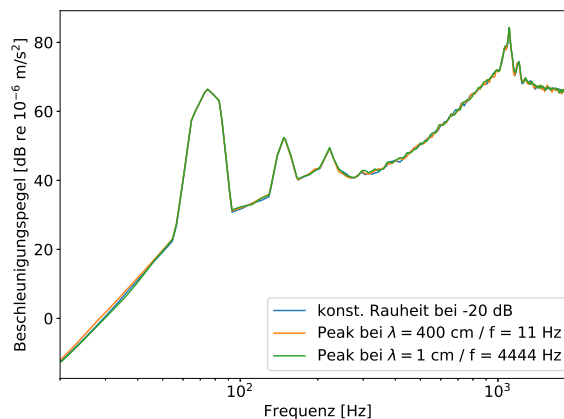


Abbildung 4: BDS bei konstantem Rauheitspegel von -20 dB im Vergleich mit zusätzlichen Peaks bei $\lambda = 400 cm$ und $\lambda = 1 cm$; $V = 160 km/h$

Diskussion

In diesem Abschnitt soll anhand der zuvor vorgestellten Ergebnisse gezeigt werden, welchen Einfluss die effektive Rauheit von Schienen- und Radlaufläche in Kombination mit Variation der Geschwindigkeit auf das BDS der Schiene hat. Dort wo dies möglich ist, wird diese Betrachtung quantitativ durchgeführt.

Das Hinzufügen von sehr großen bzw. kleinen Wellenlängen zu einer konstanten Anregung hat keinen Einfluss auf das BDS im betrachteten Frequenzbereich. Abbildung 4 zeigt, dass alle drei Kurven übereinander liegen. Die starken Peaks bei 74 Hz, 148 Hz und 296 Hz sind die sleeper-passing-Frequenz und ihre Obertöne. Bei sehr glattem effektiven Rauheitsprofil hat diese Frequenz

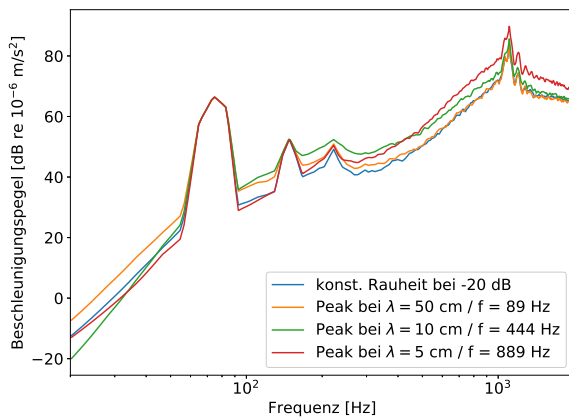


Abbildung 5: BDS bei konstantem Rauheitspegel von -20 dB im Vergleich mit zusätzlichen Peaks bei $\lambda = 50$ cm, $\lambda = 10$ cm und $\lambda = 5$ cm; $V = 160$ km/h

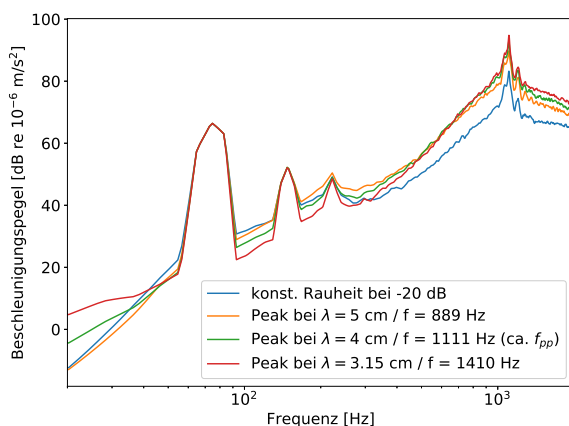


Abbildung 6: BDS bei konstantem Rauheitspegel von -20 dB im Vergleich mit zusätzlichen Peaks bei $\lambda = 5$ cm, $\lambda = 4$ cm und $\lambda = 3.15$ cm; $V = 160$ km/h

im BDS eine starke Dominanz, liegt aber 20 dB unterhalb der deutlich dominanteren pinned-pinned-Frequenz. Dass große Frequenzen/kleine Wellenlängen keinen Einfluss auf das BDS haben, wurde bereits oben erklärt und in der Simulation durch den Remington-Filter berücksichtigt. Dass sehr große Wellenlängen ebenfalls keinen Einfluss zeigen, lässt sich auf die Zuggeschwindigkeiten zurückführen. Selbst bei 300 km/h ergibt sich für Wellenlängen von 4 m nur eine Anregungsfrequenz von 19 Hz, was unterhalb des betrachteten Frequenzbereiches liegt. Anregungen im mittelfrequenten Bereich hingegen wirken sich auf den gesamten abgebildeten Frequenzbereich aus, wie in Abbildung 5 zu sehen ist. So erhöht sich das BDS im Bereich 20- 500 Hz bei einer Anregung mit 89 Hz. Die grüne Kurve für eine zusätzliche 444 Hz Anregung liegt ab 100 Hz bis zu 7 dB über der Referenzkurve. Interessant ist, dass ab 430 Hz die rote Kurve die dominantere ist, obwohl sie mit 889 Hz einen Peak mit doppelt so hoher Frequenz im Vergleich zur grünen hat. Dies lässt sich auf die starke Resonanz der Schiene im Bereich der pinned-pinned-Frequenz zurückführen. Generell scheinen Anregungen mit einer bestimmten Frequenz stärkere Auswirkungen auf einen Frequenzbereich

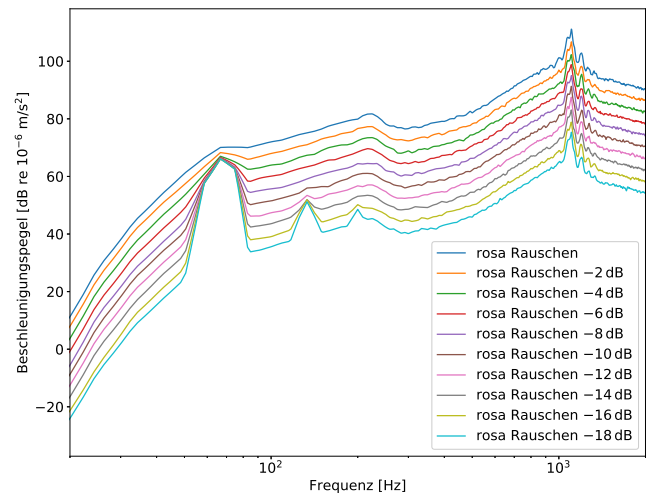
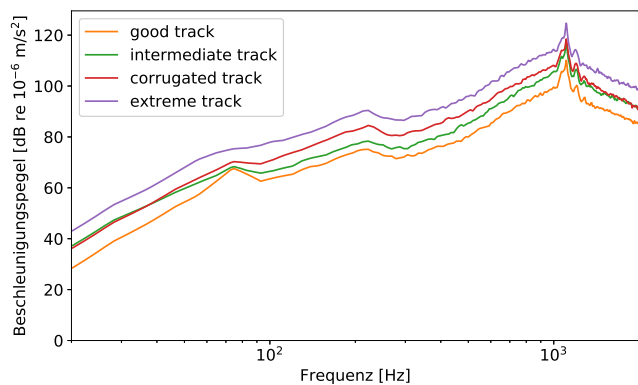
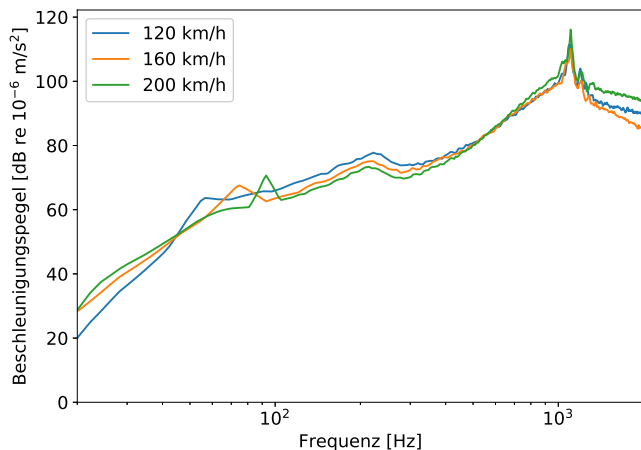


Abbildung 7: BDS mit Rosa Rauschen aus Abbildung 2 als Rauheitspegel variiert in -2 dB-Schritten; mit Remington-Filter; $V = 140$ km/h

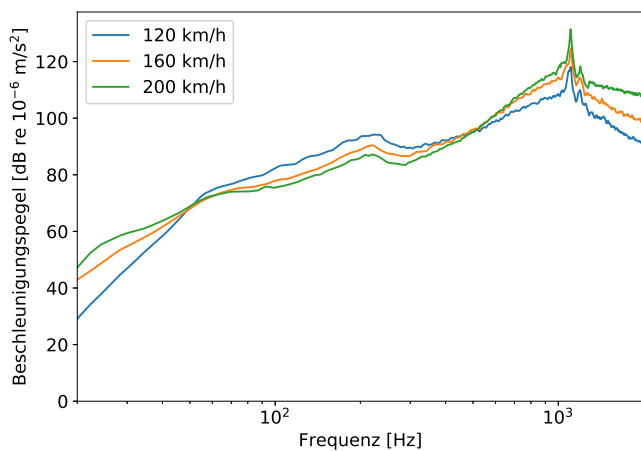
unterhalb dieser Frequenz als auf die Frequenz selbst zu haben. Dies verdeutlicht auch Abbildung 6. So ist die rote Kurve mit einem Peak im Rauheitsspektrum bei 1410 Hz im Bereich der pinned-pinned-Frequenz dominanter als die grüne Kurve, die mit einem Peak genau bei der pinned-pinned-Frequenz manipuliert wurde. Unterhalb dieses Frequenzfensters mit erhöhtem Einfluss, sinkt das BDS der roten Kurve allerdings auf Werte unterhalb der Referenzkurve. So ist das BDS der roten Kurve ab unterhalb von etwa 300 Hz bis zu 10 dB niedriger als das BDS der konstanten Rauheit ohne zusätzliche Peaks (blau). Diese Besonderheit in der Energieverteilung gilt es zukünftig gesondert zu analysieren.

Eine Erhöhung eines mit $1/\lambda$ abfallenden Rauheitspegels über das gesamte Spektrum hinweg, wie in Abbildung 7 dargestellt, bewirkt eine Erhöhung des BDS ebenfalls im gesamten betrachteten Frequenzbereich. Je niedriger das Rauheitsspektrum gewählt wird, desto stärker ausgeprägt ist die sleeper-passing-Frequenz f_{sp} mit ihren Obertönen (für $V = 140$ km/h und $l = 0.6$ m gilt: $f_{sp} = 65$ Hz).

Beim BDS der vier realen Rauheitsprofile aus Abbildung 8 bestätigt sich der soeben beim mit $1/\lambda$ abfallenden Profil diskutierte Zusammenhang, der gleichmäßigen Erhöhung des BDS über den gesamten Frequenzbereich bei gleichmäßiger Erhöhung der Rauheit über einen großen Wellenlängenbereich (Abb. 8 (a)). Außerdem wird deutlich, dass die sleeper-passing-Frequenz mit steigender Geschwindigkeit weniger stark von Rauheitsanregungen überdeckt wird. Sie hebt sich beim good track Profil für alle drei Geschwindigkeiten gut vom Spektrum ab (Abb. 8 (b)), wohingegen sie im extremen Fall gar nicht zu sehen ist (Abb. 8 (c)). Die pinned-pinned-Frequenz hingegen nimmt mit steigender Rauheit zu. Beim guten Profil liegt dort das BDS zwischen 113 dB für 120 km/h und 120 dB für 200 km/h und beim sehr geriffelten Profil bei 120 dB für 120 km/h und 135 dB für 200 km/h. Auch nimmt der Einfluss der Geschwindigkeit auf das BDS mit Erhöhung des

(a) $V = 160$ km/h

(b) good track



(c) extreme track

Abbildung 8: BDS für die Rauheitsprofile aus Abbildung 3 bei verschiedenen Zuggeschwindigkeiten: (a) vier verschiedene effektive Rauheitsprofile bei $V = 160$ km/h; (b) good track - Profil bei $V = 120$ km/h, $V = 160$ km/h und $V = 200$ km/h; (c) extreme track - Profil bei $V = 120$ km/h, $V = 160$ km/h und $V = 200$ km/h

Profilpegels zu. Bei geringerer effektiver Rauheit unterscheiden sich die Pegel der pinned-pinned-Frequenz nur um 7 dB, bei großen Rauheiten um 15 dB. Dass diese Geschwindigkeitsabhängigkeit im Bereich 800 Hz-2000 Hz so hoch ist, kann an der charakteristischen Wellenlänge ($\lambda = 5$ cm) von klotzgebremsten Rädern liegen. Bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h führt diese Wellenlänge zu Anregungen bei 667 Hz, zu 889 Hz bei

160 km/h und zu 1111 Hz bei 200 km/h, was genau der pinned-pinned-Frequenz entspricht. Dass die Geschwindigkeit im Bereich 50 Hz-500 Hz einen umgekehrten Einfluss auf das BDS hat, obwohl bekannt ist, dass sich mit steigender Geschwindigkeit die Schallabstrahlung erhöht, kann damit erklärt werden, dass ab 120 km/h der Beitrag der Schiene zur Schallabstrahlung unter den Beitrag der Räder sinkt [7] und somit das gesamte Spektrum betrachtend die Schallabstrahlung mit der Geschwindigkeit dennoch steigt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen mit dem Nordborg-Modell haben gezeigt, dass breitbandige Rauheitsanregungen Auswirkungen auf das BDS im gesamten betrachteten Frequenzbereich von 20 Hz-2000 Hz haben. Ein Absinken des Rauheitsspektrums wird das BDS zunehmend von der sleeper-passing-Frequenz dominiert. Bei Rauheitsanregungen für einzelne Frequenzen hingegen, müssen noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die Auswirkungen auf das Schwingverhalten der Schiene systematisch zu beschreiben und die Zusammenhänge zu erklären, da schmalbandige Anregungen Auswirkungen auf das BDS auch weit entfernt von der Anregungsfrequenz haben. Eine systematische Betrachtung der Geschwindigkeit hat gezeigt, dass Geschwindigkeiten um die 200 km/h eine besonders starke Anregung der pinned-pinned-Frequenz zur Folge haben, wenn im effektiven Rauheitsspektrum charakteristische Wellenlängen von 5 cm auftreten. .

Literatur

- [1] Nordborg, A.: Vertical Rail Vibrations: Noise and Structure-borne Sound Generation. TRITA-FKT report, Kungliga Tekniska Högskolan Institute of Technology, Department of Vehicle Engineering, 1995
- [2] Nordborg, A.: Vertical Rail Vibrations: Pointforce Excitation. In: Acta Acustica united with Acustica 84 (1998), 280–288.
- [3] Nordborg, A.: Vertical Rail Vibrations: Parametric Excitation. Acta Acustica united with Acustica 84 (1998), 289–300.
- [4] Nordborg, A.: Wheel/rail noise generation due to nonlinear effects and parametric excitation. The Journal of the Acoustical Society of America 111 (2002), 1772–1781
- [5] Remington, P. J.: Wheel/rail noise – part IV: rolling noise. Journal of Sound and Vibration 46 (1976), 419–436.
- [6] Europäische Kommission: Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem „Fahrzeuge - Lärm“ des konventionellen transeuropäischen Bahnsystems, 2011
- [7] Thompson, D. J.: Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. Elsevier Science, 2008
- [8] Sellgren, U.: Simulation of brake block induced corrugation on railway wheels, Department of Machine Design Royal Institute of Technology, Stockholm, 1998