

## Zeitbereichsmodelle für das Rad-Schiene-Rollgeräusch - Teil 1: Schienenmodelle

Ina Richter, Jeffrey Thomsen, Katja Stampka, Ennes Sarradj

TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik, Einsteinufer 25, 10587 Berlin, katja.stampka@tu-berlin.de

### Einleitung

Rollgeräusche sind insbesondere bei mittleren Fahrgeschwindigkeiten, wie sie in Ballungsgebieten und im Nahverkehr vorkommen, eine dominante Schallquelle bei der Betrachtung von Schienenlärm. Um gegen die Entstehung von Rollgeräuschen vorzugehen ist es unablässig ursächliche Mechanismen bei der Rollgeräuschentstehung zu verstehen. Hierfür werden zwei Schienenmodelle, welche die Grundlage zweier Zeitbereichsmodelle für das Rad-Schiene-Rollgeräusch bilden, validiert und verglichen. Es wird untersucht, ob und inwiefern das Schienenmodell von Nordborg, welches auf der Balkentheorie des Euler-Bernoulli-Balkens basiert und das Thompson/Wu-Modell, dem ein Timoschenko-Balken zugrunde liegt, Unterschiede bei einer Punktkraftanregung aufweisen. Die Validierung wird anhand der Track Decay Rate durchgeführt. Beim Vergleich wird zusätzlich die Punktrezep-tanz als Vergleichsgröße herangezogen.

### Modellannahmen und Vergleichsgrößen

Es gibt eine Vielzahl an Modellen, die die Interaktion von Schiene und Rad und die damit einhergehende Rollgeräuschentstehung abbilden. Im Allgemeinen wird dabei davon ausgegangen, dass hauptsächlich vertikale Kräfte und Auslenkungen zur Geräuschentstehung beitragen [1]. Die Schiene wird in beiden Modellen als ein unendlich langer Balken angenommen, der bei Nordborg unendlich bei Thompson/Wu endlich periodisch gelagert ist. Der Balken bei Nordborg ist ein schubstarrer Euler-Bernoulli-Balken. Dem Thomson/Wu-Modell liegt die Timoschenko-Balken-Theorie zugrunde, also ein schubweicher Balken der Schubdeformationstheorie erster Ordnung [2]. Die diskrete Lagerung wird in beiden Modellen durch ein Feder-Messe-Feder-System dargestellt, wobei die obere Feder  $K_p$  das Schienenlager (engl.: pad), die Masse  $M_s$  eine halbe Schwelle und die untere Feder  $K_b$  den Schotter (engl.: ballast) abbildet. Beide Modelle berücksichtigen Dämpfungseffekte ( $\eta_b, \eta_p$ ) durch komplexe Federsteifigkeiten und rechnen mit einer dynamischen, also frequenzabhängigen, Gesamtsteifigkeit  $K$  des Feder-Masse-Feder-Systems [3; 4].

$$K = \frac{K_p(1 + i\eta_p)[K_b(1 + i\eta_b) - M_s\omega^2]}{K_p(1 + i\eta_p) + K_b(1 + i\eta_b) - M_s\omega^2} \quad (1)$$

Ein wesentlicher Unterschied bei der mathematischen Beschreibung der Schienenmodelle ist, dass dem Nordborg-Modell eine analytische Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung eines diskret, periodisch gelagerten Euler-Bernoulli-Balkens im Zeitbereich (Greensche Funktion im Zeitbereich) zugrunde liegt und das Modell von Thompson/Wu auf einer Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung eines diskret, periodisch gelagerten

Timoschenko-Balkens im Frequenzbereich (Greensche Funktion im Frequenzbereich) von M. Heckl [12] basiert. Voraussetzung dieser Lösung ist, dass die Geschwindigkeit des Zuges sehr klein im Vergleich zur Biege-wellengeschwindigkeit ist. Beim Nordborg-Modell wird diese Annahme zur Berechnung der TDR und der Punktrezep-tanzen hier ebenfalls getroffen. Es sei erwähnt, dass eine Simulation mit bewegter Punktkraftanregung mit dem Modell von Nordborg möglich ist [6], hier jedoch für eine bessere Vergleichbarkeit darauf verzichtet wird.

Die beiden Schienenmodelle werden anhand der Punktrezep-tanzen und der Abklingrate der Schiene (Track Decay Rate - TDR) verglichen und validiert. Punktrezep-tanzen geben das Verhältnis einer Punktkraftanregung zur resultierenden Schienenauslenkung an und die Abklingrate der Schiene quantifiziert, um wie viel dB die Biege-wellen der Schiene pro 1 m abklingen.

### Messwerte

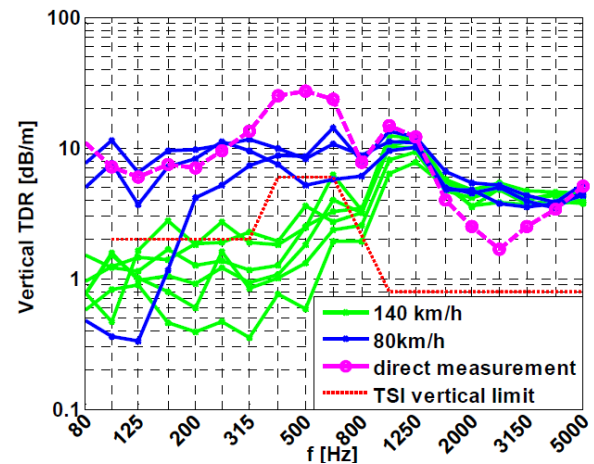


Abbildung 1: Track Decay Rate aus der indirekten und direkten Messung von östlicher und westlicher Schiene [9]

Die Bestimmung der TDR kann experimentell auf zwei Wegen erfolgen: direkte und indirekte Messung. In beiden Fällen werden vertikale Beschleunigungsaufnehmer durch Kleben unterhalb der Schiene oder des Schienenkopfen angebracht. Bei der direkten Messung nach EN 15461:2008 [7] wird die eingehende Kraft mittels Prüfhammer erfasst und die Schienenantwort mit den Beschleunigungsaufnehmern gemessen, die sich in unterschiedlicher Entfernung zum Kraftangriffspunkt befinden. Die indirekte Messung folgt einem Schlussentwurf des CEN-Ausschusses für Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik [8]. Hier erfolgt die Kraftanregung durch die Kontaktkraft zwischen Rad und Schiene bei einer Zugvorbeifahrt. Dabei wird die Beschleunigung der

Schiene in der Schwellenfachmitte und nahe einer Schwelle erfasst. Bei diesem Verfahren wird versucht den Einfluss der Räder aufeinander rechnerisch zu eliminieren. Die Auswertung beider Messverfahren für Gleis B mit den Parametern aus Tabelle 1 zeigt Abbildung 1. Beim vorbeifahrenden Zug handelt es sich um einen Nahverkehrszug vom Typ "Bombardier Talent 2", der die Beschleunigungsaufnehmer drei mal mit 80 km/h und fünf mal mit 140 km/h passierte.

In allen Verläufen der indirekt ermittelten TDR ist deutlich ein Einbruch der Abklingrate bei etwa 800 Hz zu erkennen. Dies ist die „pinned-pinned“-Frequenz. Ihre Wellenlänge entspricht dem doppelten Schwellenabstand und die Biegewellen der Schiene können sich bei dieser Frequenz nahezu ungehindert ausbreiten. Die Einbrüche der TDR oberhalb von 2000 Hz sind auf den Effekt des „foot-flapping“ zurückzuführen. Der Schienenfuß schwingt dabei in seinen Eigenmoden. Eine Unterteilung der Schiene in Schienenkopf, -steg und -fuß findet in den Modellen nicht statt, weshalb dieser Effekt dort nicht berücksichtigt wird. In den nachfolgenden Vergleichen werden deshalb nur Frequenzen bis 2000 Hz betrachtet. Die hohe Abklingrate um 500 Hz bei der direkt gemessenen TDR ist auf die im vorangegangenen Abschnitt erwähnten dynamischen Eigenschaften der Schienenlagerung zurückzuführen. Das Feder-Masse-Feder-System fungiert in diesem Frequenzbereich als dynamischer Absorber. Die Höhe des Maximums oberhalb der „pinned-pinned“-Frequenz ist von den Steifigkeiten der Gleiszwichenlagen abhängig. [10]

Bei der indirekt gemessenen TDR scheint bis 800 Hz eine Geschwindigkeitsabhängigkeit vorzuliegen. Dort liegt die Abklingrate der schnelleren Zugvorbeifahrt zum Teil sehr weit unterhalb der langsameren. Oberhalb von 800 Hz verlaufen die Grafen hingegen nahezu synchron und die Abklingrate scheint hier geschwindigkeitsunabhängig zu sein. Dieser Zusammenhang wird bei der Validierung des gesamten Schiene-Rad-Kontakt-Modells im 2. Teil der hier begonnenen Untersuchungen [13] noch von Bedeutung sein.

Da im Modell von Thompson/Wu von einer nicht bewegten Punktkraftanregung ausgegangen wird, soll ein Vergleich mit der direkt gemessenen TDR im Folgenden im Fokus stehen.

## Validierung und Vergleich der Modellergebnisse

In diesem Abschnitt sollen die Modellergebnisse anhand von Messdaten validiert werden. Außerdem soll untersucht werden, inwiefern die Unterschiede in den Modellannahmen sich beim Ergebnisvergleich niederschlagen. Dazu werden sowohl die Schienenrezeptanzen als auch die Abklingraten aus beiden Modellen miteinander verglichen.

Da nicht alle Parameter aus den Messungen bekannt waren, die für eine Simulation und die damit einhergehende Validierung nötig sind, musste eine Anpassung der für die Modelle gewählten Parameter vorgenommen werden (curve-fitting). Die Parameter aus dieser Anpassung sind

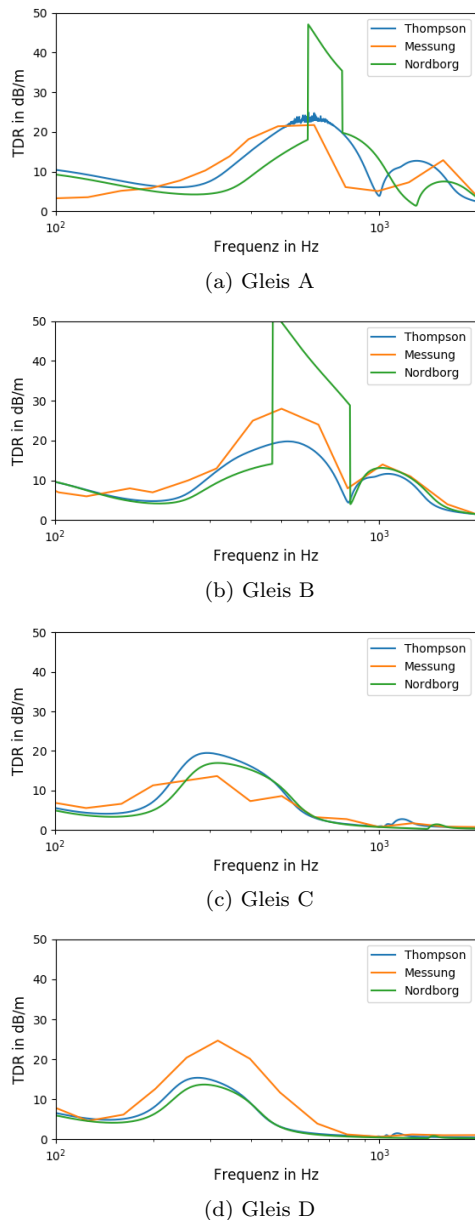
**Tabelle 1:** Parameter für die Simulationen. Die fettgedruckten Größen sind bekannte Größen aus der Messung.

Parameter	Gleis A	Gleis B	Gleis C	Gleis D
E-Modul $E$	$210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$210 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
Schubmodul $G$	$77 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$77 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$77 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$77 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
Dichte $\rho$	$7850 \text{ kg/m}^3$	$7850 \text{ kg/m}^3$	$7850 \text{ kg/m}^3$	$7850 \text{ kg/m}^3$
Schubkorrekturfaktor $\kappa$	0,4	0,4	0,4	0,4
Verlustfaktor der Schiene $\eta_r$	0,01	0,02	0,01	0,01
längenbezogene Masse der Schiene $m'$	$54,77 \text{ kg/m}$	$54,57 \text{ kg/m}$	$60,21 \text{ kg/m}$	$60,21 \text{ kg/m}$
Flächenträgheitsmoment $I$	$23,38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$	$20,67 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$	$30,38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$	$30,38 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$
Schwellenabstand $l$	$0,6 \text{ m}$	$0,67 \text{ m}$	$0,6 \text{ m}$	$0,6 \text{ m}$
Steifigkeit der Gleiszwichenlagen $K_p$	$1300 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$1000 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$350 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$200 \cdot 10^6 \text{ N/m}$
Verlustfaktor der Gleiszwichenlagen $\eta_p$	0,25	0,25	0,25	0,25
halbe Schwellenmasse $M_s$	$122 \text{ kg}$	$143 \text{ kg}$	$162 \text{ kg}$	$120 \text{ kg}$
Steifigkeit des Schotters $K_b$	$67 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$85 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$50 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$50 \cdot 10^6 \text{ N/m}$
Verlustfaktor des Schotters $\eta_b$	2,0	1,0	1,0	1,0

in Tabelle 1 zusammengefasst. Zum Vergleich wurden verschiedene Gleise herangezogen, von denen die Abklingraten gemessen wurden. Die Messwerte der Gleise A, C und D sind einer Studie zum Schienenverhalten von Vincent/Thompson [11] entnommen. Für die Messdaten von Gleis B, lag die Dipolmarke von Ooppel vor. [9]

Abbildung 2 zeigt die direkt gemessene TDR der Gleise A-D im Vergleich mit der TDR aus der Thompson/Wu- und der Nordborg-Simulation. Die gemessene und die von Thompson/Wu simulierte TDR zeigen qualitativ einen sehr ähnlichen Verlauf. Der Grund für die hohe Dämpfung sind die dynamischen Absorbereigenschaften des Feder-Masse-Feder-Systems von Gleiszwichenlagen, die von Thompson in [10] genauer beschrieben werden. Dieser Absorber ist Teil der Lagersteifigkeiten  $K$  aus Gleichung (1), die für die verwendeten Parameter bei 500 Hz ein starkes Maximum aufweisen. Der darauf folgende Einbruch in der TDR hin zur „pinned-pinned“-Frequenz verläuft bei Thompson/Wu nah an der Messung und wird genau getroffen.

Auch das Nordborg-Modell simuliert einen Einbruch bei der „pinned-pinned“-Frequenz, trifft diese allerdings nicht genau. Außerdem fällt in der Simulation der Gleise A und B ein breites Maximum im Bereich des dynamischen Absorbers zwischen 500 Hz und 800 Hz auf, welches einem Sperrfilter gleicht. Da in den Messdaten zwar ein Maximum, jedoch kein Sperrband zu finden ist, muss es weitere Gründe für die hohen simulierten



**Abbildung 2:** gemessene TDR der Gleise A, C und D mit simulierter TDR aus dem Thompson/Wu-Modell und dem Nordborg-Modell

TDR-Werte geben, die bis zu 25 dB über den Messwerten liegen. Einer dieser Gründe kann in der Annahme eines unendlichen, perfekt periodischen Systems, von dem die Nordborg-Simulation ausgeht, liegen, das weder bei Thompson/Wu noch bei der Messung vorliegt. Perfekte Periodizität lag bei der Messung nicht vor, da Schwellenabstände und auch die Lagersteifigkeiten  $K$  in der Realität leicht variieren. Thompson und Wu gehen zwar ebenfalls von einer perfekten Periodizität aus, betrachten jedoch eine endlich periodische Lagerung. Das zweite Maximum oberhalb der „pinned-pinned“-Frequenz simuliert das Nordborg-Modell für Gleis B mit sehr guter Genauigkeit.

Es ist auffällig, dass mit sinkender Steifigkeit der Gleiszwischenlagen das Maximum oberhalb der „pinned-pinned“-Frequenz abnimmt und auch der Sperrband-

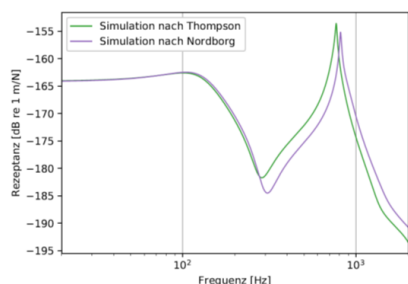
effekt aus der Nordborg-Simulation zunächst schmalbandiger wird und dann ganz verschwindet. Im Vergleich mit Gleis A ist gut zu erkennen, dass das Nordborg-Modell die „pinned-pinned“-Frequenz nicht trifft. Nordborg schlägt deshalb eine Korrektur des Flächenträgheitsmomentes auf 75% vor, um die Annahme eines schubstarrten Balkens auszugleichen. Eine solche Anpassung nähert die Simulation zwar an die Messdaten an, aber die „pinned-pinned“-Frequenz wird dennoch nicht exakt getroffen. Der qualitative Verlauf beider Simulationen ist der gemessenen TDR sehr ähnlich. Die Resonanzen der dynamischen Absorber werden getroffen. Es kann weder im gesamten Frequenzbereich, noch für bestimmte Bereiche eine generelle Über- oder Unterschätzung der Messwerte festgestellt werden. Bei Nichtbetrachtung des Sperrbandes bei Nordborg, kann gesagt werden, dass die Simulationen die TDR bei Gleis B und D unterschätzen, jedoch bei Gleis C im Bereich des dynamischen Absorbers die Messdaten deutlich überschreiten. Gleis A wird hingegen sehr nah an den Messergebnissen simuliert. Diese Inkonsistenz bei den Messabweichungen kann schwer auf einen systematischen Fehler oder Modellannahmen zurückgeführt werden, weshalb die Ursache in den nicht hinreichend bekannten Gleisparametern gefunden werden kann, die teilweise durch curve-fitting abgeschätzt werden mussten (siehe hierzu auch [11]).

Beim Vergleich beider Simulationen miteinander ist zu sehen, dass bei den Gleisen C und D, bei denen der Sperrbandeffekt nicht auftritt, beide Simulationen sehr ähnlich verlaufen. Im Bereich des dynamischen Absorbers um 500 Hz, bei dem das Masse-Feder-System aus Schwelle und Gleiszwischenlager eine Resonanz hat, weichen beide Simulationen stark von der Messung ab. Oberhalb von 900 Hz trifft das Nordborg-Modell die Messkurven der Gleise A und B deutlich besser als die Simulation von Thompson/Wu.

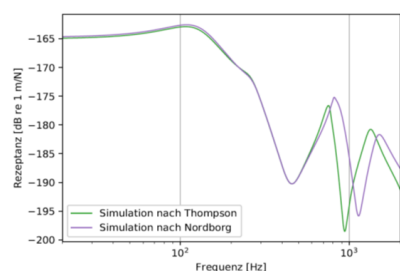
Abbildung 3 zeigt die Punktrezepstanzen der Schienenmodelle von Nordborg und Thompson/Wu einmal in der Mitte eines Schwellenfachs und einmal auf einer Schwelle. Die Kurve aus dem Nordborg-Modell ist in Relation zu Thompson/Wu leicht nach rechts verschoben. Dies führt auf leichte Unterschiede in der „pinned-pinned“-Frequenz, die bei Thompson/Wu bei Anregung in Schwellenfachmitte bei 770 Hz und bei Nordborg mit einem geringeren Peak bei 810 Hz liegt. Diese Verschiebung ist bei Anregung auf einer Schwelle größer. So liegt der Einbruch bei der Antiresonanz für Thompson/Wu bei 940 Hz und für Nordborg bei 1130 Hz. Diese Differenz von 170 Hz versucht Nordborg durch Anpassung des Flächenträgheitsmoments auf 75% zu erreichen. Je kleiner dieses gewählt wird, umso stärker verschiebt sich die Kurve nach links. Um eine gute Übereinstimmung mit Thompson zu erzielen, wäre ein Absenken auf 50% nötig, was physikalisch allerdings nicht mehr sinnvoll erscheint.

## Diskussion und Ausblick

Im Folgenden sollen die oben benannten Unterschiede analysiert und diskutiert werden. Der Unterschied zwischen direkt und indirekt gemessener TDR kann in der



(a) Anregung in Schwellenfachmitte



(b) Anregung auf einer Schwelle

**Abbildung 3:** Vergleich der Punktrezeptanzen aus den beiden Modellen bei Anregung in Schwellenfachmitte und auf einer Schwelle

unterschiedlichen Vorlast beider Verfahren gefunden werden. Thompson und Wu haben in [4] gezeigt, dass die Steifigkeiten von Schotter und Gleiszwichenlagen mit der Vorlast variieren. Da die Vorlast sich bei einer Zugvorbeifahrt stark ändert, kann die Lagersteifigkeit als zeitlich veränderliche Größe betrachtet werden, was in den Modellen jedoch nicht berücksichtigt wird. Die Ursache für die großen Diskrepanzen im Bereich der Schwellen-Pad-System-Resonanz beim Thompson/-Wu-Modell könnte sein, dass es in der Realität im Gegensatz zu den Modellen keine perfekte Periodizität in den Schwellenabständen gibt. Dies führt nach Untersuchungen von Heckl in [5] zum „Einfangen“ der Biegewellen am Anregungspunkt. Das Resultat sind höhere Amplituden der Biegewellen direkt neben dem Anregungspunkt, aber eine größere Dämpfung an weiter entfernten Punkten, was als Ursache für die höhere Dämpfung bei der Messung benannt werden kann. Neben den periodischen Schwellenabständen wurden in beiden Modellen auch periodisch auftretende Lagersteifigkeiten angenommen. Da mit Unregelmäßigkeiten in der Schotterverteilung und Unterschieden bei der Vorspannung und in den Steifigkeiten der Gleiszwichenlagen zu rechnen ist, ist eine solche Konstanz beim Gleisabschnitt, auf dem die Messung durchgeführt wurde, wahrscheinlich nicht gegeben. Die Annahme einer unendlichen, periodischen Lagerung bei Nordborg im Vergleich zur endlichen Lagerung bei Thompson/Wu hat ebenfalls Einfluss auf die Simulation, wie der Sperrbandeffekt zeigt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im betrachteten Frequenzbereich die qualitativen Verläufe der beiden Simulationen ähnlich gut an den Messwerten liegen, wenn der Sperrbandeffekt der Nordborg-Simulation au-

ßer Acht gelassen wird. Die „pinned-pinned“-Frequenz wird vom Thompson/Wu-Modell besser getroffen.

Da das Flächenträgheitsmoment Einfluss auf die Lage der „pinned-pinned“-Frequenz hat, könnte für eine potenzielle Optimierung und Vermeidung einer Flächenträgheitsmomentanpassung im Nordborg-Modell ein Timoshenko-Balken zugrunde gelegt werden. Alternativ könnte das Einfügen kleiner Zufallsabweichungen für die Steifigkeiten und Verlustfaktoren der Gleiszwichenlagen und des Schotters in beide Simulationen helfen, eine bessere Annäherung an die Messwerte zu erreichen und den Sperrbandeffekt beim Nordborg-Modell zu vermeiden. Des Weiteren wäre eine genauere Ermittlung der Gleisparameter bei den Messungen für verlässlichere Validierungsaussagen von großem Vorteil.

## Danksagung

Ich danke Torsten Kohrs und Maik Oppel für die Bereitstellung der Messdaten.

## 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] Öchsner, A.: Theorie der Balkenbiegung. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2016
- [3] 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
- [4] Wu, T. X.; Thompson, D. J.: The effects of local pre-load on the foundation stiffness and vertical vibration of railway track. Journal of Sound and Vibration 219 (1999), 881–904
- [5] Heckl, M. A.: Railway Noise - Can Random Sleeper Spacings Help?. Acta Acustica united with Acustica 81 (1995), 559–564
- [6] Nordborg, A.; Kohrs, T.: Ein Zeitbereichsmodell zur Beschreibung der Rollgeräusentstehung. DAGA Nürnberg, 2015
- [7] EN 15461. Railway applications – Noise emissions – Characterisation of the dynamic properties of track sections for pass-by noise measurements. 2008
- [8] FprCEN/TR 16891: Railway applications - Acoustics - Measurement method for combined roughness, track decay rates and transfer functions. 2015
- [9] Oppel, M.: Indirect Determination of the Track Decay Rate and the Wheel/Rail Roughness from Train Pass-by Rail Accelerations. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, 2011
- [10] Thompson, D. J.: Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. Elsevier Science, 2008
- [11] Vincent, N.; Thompson, D.J.: Track Dynamic Behaviour at High Frequencies. Part 2: Experimental Results and Comparisons with Theory. Vehicle System Dynamics, 24 (1995), 100-114
- [12] Heckl, M. A.: Coupled waves on a periodically supported Timoshenko beam. Journal of Sound and Vibration 252 (2002), 849–882
- [13] Thomsen, J.: Zeitbereichsmodelle für das Rad-Schiene-Rollgeräusch - Teil 2: Kontaktmodelle. DAGA Rostock, 2019