

# Analyse-Tool zur indirekten Bestimmung von Rollgeräusch-Parametern im Schienenverkehr

Sören Franz Thilo Hanisch, Julian Lohbreier, Luca Pablo Thomma, Markus Hecht

TU Berlin, Fachgebiet Schienenfahrzeuge, Salzufer 17-19, 10587 Berlin, E-Mail: hanisch@tu-berlin.de

## Einleitung

Das Rollgeräusch stellt eine von drei wesentlichen Geräuschquellen im Schienenverkehr dar und ist üblicherweise dominant in einem Geschwindigkeitsbereich von ca. 60 km/h bis ca. 300 km/h [1]. Zu den wesentlichen Parametern im Entstehungsmechanismus des Rollgeräuschs zählen die Gleisabklingrate (TDR) und die kombinierte Rauheit aus Schienen- und Radrauheit. Diese Parameter sind zeitlichen Veränderungen unterworfen und können zwischen einzelnen Strecken und Fahrzeugen (stark) variieren. Daher sind sie u. a. bei der Bewertung von Lärminderungsmaßnahmen am Schienenfahrweg messtechnisch zu erfassen und auszuwerten. Hierbei ist die Anwendung der Verfahren des DIN CEN/TR 16891 [2] zur indirekten Bestimmung dieser Parameter anhand von Beschleunigungs- und Schalldruckmessungen am Gleis während Zugvorbeifahrten zweckdienlich.

In diesem Beitrag wird ein Analyse-Tool vorgestellt, welches auf den genannten Verfahren basiert und dazu dient, das auftretende Rollgeräusch an verschiedenen Strecken zu verschiedenen Zeitpunkten zu vergleichen und zu bewerten. Angewendet wird das Analyse-Tool derzeit im Zusammenhang mit der messtechnischen Untersuchung von Lärminderungsmaßnahmen an Eisenbahnbrücken im Zuge des Shift2Rail-Projekts „Assets4Rail“. Hierfür sind im Abstand von einem Jahr vor und nach Einbau einer Lärminderungsmaßnahme akustische Messungen durchgeführt worden. Veränderungen der wesentlichen Rollgeräusch-Parameter können anhand des Analyse-Tools untersucht und bei der Bewertung der Lärminderungsmaßnahme herangezogen werden.

Zunächst wird eine kurze Einführung in die Entstehungsmechanismen des Rollgeräuschs sowie in die Mess- und Auswerteverfahren des DIN CEN/TR 16891 [2] gegeben. Anschließend erfolgt die Vorstellung des Analyse-Tools sowie beispielhafter Ergebnisse aus dem Projekt „Assets4Rail“.

## Einführung Rollgeräusch

Der Ausgangspunkt bei der Entstehung des Rollgeräuschs ist die energetische Summe der akustischen Rauheit von Radlauffläche und Schienenoberfläche unter Berücksichtigung eines Kontaktfilters. Diese sogenannte kombinierte Rauheit führt beim Rollen des Rades auf der Schiene zu einer Schwingungsanregung dieser beiden Komponenten. Diese Schwingungen breiten sich in der Folge innerhalb des Gleises und des Fahrzeugs aus und werden als Luftschall abgestrahlt. Für das Rollgeräusch sind beim Schottergleis insbesondere die Abstrahlung von Rad, Schiene und Schwelle von Bedeutung. [1]

Für die Bestimmung der charakteristischen akustischen Eigenschaften des Gleises in Form der lateralen und vertikalen Gleisabklingrate (engl. Track Decay Rate (TDR)) und der Schienenrauheit existieren direkte Verfahren [3, 4], welche zeitlich aufwändig sind und ein gesperrtes Gleis erfordern. Die Radrauheit als eine charakteristische akustische Größe des Rades kann ebenfalls direkt bestimmt werden [5]. Dieses ebenfalls sehr aufwändige Verfahren erfordert eine Werkstatt, um das Fahrzeug aufzubocken und wird deswegen nur selten durchgeführt. Um dennoch eine Aussage über die akustischen Eigenschaften von Strecke, Fahrzeug und Ausbreitungsweg treffen zu können, wurden indirekte Verfahren entwickelt, die die Bestimmung von Gleisabklingrate, kombinierter Rauheit sowie der akustischen Übertragungsfunktion des Rollgeräuschs ermöglichen. Diese Verfahren basieren im Wesentlichen auf Messungen der Schienenschwingungen sowie des Geräuschs während der Zugvorbeifahrten und sind u. a. in [6] und in dem DIN CEN/TR 16891 [2] beschrieben.

In Abbildung 1 ist der typische Messaufbau zur Messung der Schienenbeschleunigungen und zur Detektion der Raddurchfahrt mithilfe von Lichtschranken dargestellt. Für die hier beschriebenen Verfahren sind lediglich der Beschleunigungssensor am Schienenkopf in lateraler Richtung, ein Beschleunigungssensor am Schienenfuß (nicht sichtbar) in vertikaler Richtung sowie die Lichtschranken notwendig. Anhand der Lichtschranken kann die Fahrgeschwindigkeit  $v$  sowie die Anzahl der Achsen  $N_{ax}$  bestimmt werden. Des Weiteren empfehlen sich Laser-Lichtschranken auf Pufferhöhe (nicht dargestellt), um die Zuglänge  $l$  zu bestimmen. Die Mikrofone zur Messung des Rollgeräuschs werden in der Regel 7,5 m von Gleismitte sowie 1,2 m über Schienenoberkante positioniert.

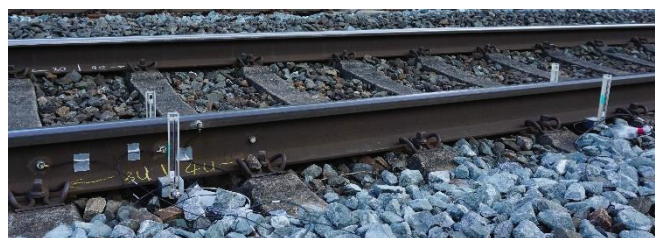


Abbildung 1: Typischer Messaufbau im Gleis.

Gemäß DIN CEN/TR 16891 [2] ist die Gleisabklingrate über das sogenannte Energie-Iterationsverfahren zu berechnen, welches hier nicht weiter beschrieben wird. Die kombinierte Rauheit  $L_{Rtot}$  wird nach [2, Gleichung (9)] erhalten über

$$L_{Rtot}(f_c, v) = L_{aeq, \tau_p}(f_c, v) + 10 \lg \left( \frac{D_z(f_c) l}{8,686 N_{ax}} \right) - A_1(f_c, v) - A_2(f_c, v) - 40 \lg(2\pi f_c) \quad (1)$$

mit

- $L_{aeq,Tp}$  als energieäquivalenten Beschleunigungspegel der Zugvorbeifahrt, gemessen am Schienenfuß in vertikaler Richtung,
- $D_z$  als Gleisabklingrate in vertikale Richtung,
- $A_1$  als Übertragungsfunktion von Schienenkopf zu Schienenfuß,
- $A_2$  als Differenz zwischen kombinierter Rauheit und Kontaktpunktverschiebung und
- $f_c$  als Mittenfrequenz der Terzbänder.

Die Terme  $A_1$  und  $A_2$  können messtechnisch bzw. rechnerisch ermittelt werden. Angaben zu diesen Termen lassen sich ebenso in der Literatur z. B. in [2, 6] finden.

Die Übertragungsfunktion des Rollgeräuschs  $L_{HpR_{tot,nl}}$  kann nach [2, Gleichung (13)] erhalten werden über

$$L_{HpR_{tot,nl}}(f_c) = L_{peq,Tp}(f_c) - L_{R_{tot}}(f_c, v) - 10 \lg \left( \frac{N_{ax}}{l} \right) \quad (2)$$

mit  $L_{peq,Tp}$  als energieäquivalenter Schalldruckpegel der Zugvorbeifahrt. Diese Funktion „ist von Rauheit, Zuglänge und Anzahl der Achsen unabhängig [und] charakterisiert die vibroakustischen Eigenschaften des Fahrzeugs, der Strecke und des Ausbreitungsweges“ [2, Kapitel 14.1].

### Vorstellung des Analyse-Tools

Das entwickelte Analyse-Tool hat zum Ziel, für eine Vielzahl von Vorbeifahrten von unterschiedlichen Zügen, die Gleisabklingrate, die kombinierte Rauheit sowie die Übertragungsfunktion anhand der beschriebenen Verfahren zu berechnen und übersichtlich darzustellen. Bei bekannter Schienenrauheit ist außerdem die Bestimmung der mittleren Radrauheit des gesamten Zuges möglich.

Das Analyse-Tool besteht aus zwei Teilen: einem Einstellungsfenster und einem Hauptfenster.

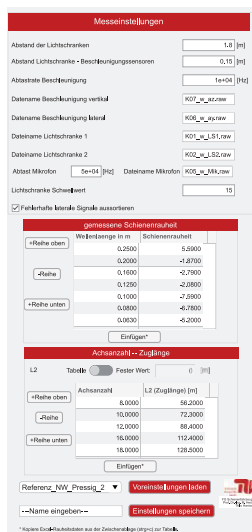


Abbildung 2: Analyse-Tool: Einstellungsfenster.

Im Einstellungsfenster (siehe Abbildung 2) werden die Dateinamen der Messsignale, der Abstand der beiden Lichtschranken zueinander sowie der Abstand der Beschleunigungssensoren zur ersten Lichtschranke festgelegt. Des Weiteren können die Werte der gemessenen Schienenrauheit sowie eine Aufschlüsselung von Achsenzahl zu Zuglänge (bei bekanntem Fahrzeugtyp) hinterlegt werden.

Im Hauptfenster (siehe Abbildungen 3 und 4) werden die Einstellungen zur Berechnung (z. B. Parameter des Energie-Iterationsverfahrens,  $A_2$ -Faktors sowie Kontaktfilters) getätigt sowie die Messdaten eingelesen. Nach erfolgter Berechnung werden die Ergebnisse der Gleisabklingrate in lateraler und vertikaler Richtung, die kombinierte Rauheit (bzw. getrennt nach Schienen- und Radrauheit) sowie die Übertragungsfunktion graphisch dargestellt. Außerdem werden die Ergebnisse tabellarisch aufgelistet. Hier werden u. a. Fahrgeschwindigkeit, deren Änderung, Zuglänge, Achsenzahl sowie Einzahlwerte für beide Gleisabklingraten [7] und die kombinierte Rauheit [8] angegeben. Diese Darstellung bzw. Auflistung kann für jede Fahrt einzeln und gemittelt über alle Fahrten erfolgen. Hierbei wird auch das 10 %- und 90 %-Quantil aller Werte ermittelt.

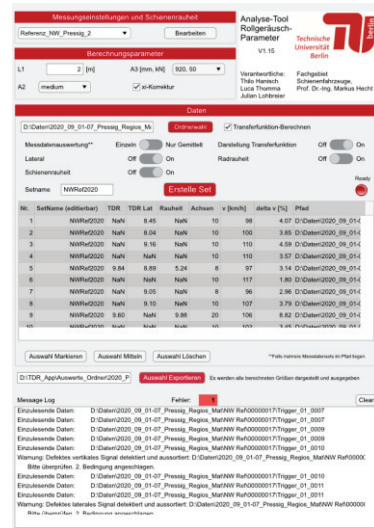


Abbildung 3: Analyse-Tool: Hauptfenster, linke Seite.

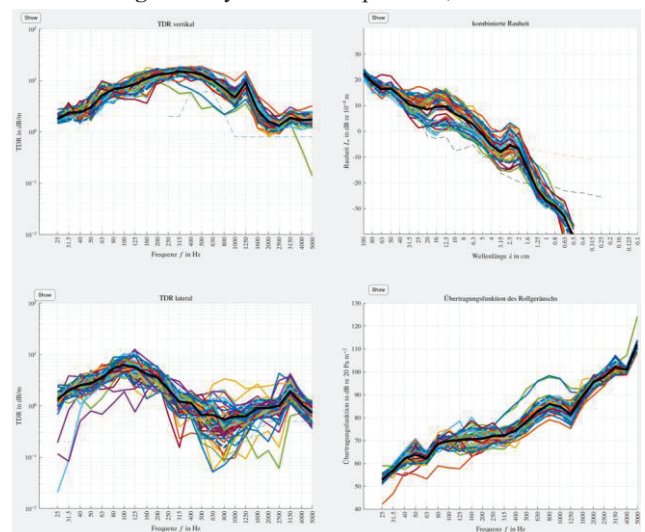


Abbildung 4: Analyse-Tool: Hauptfenster, rechte Seite.

Die Daten und Grafiken können anschließend exportiert werden. Werden bei der Berechnung fehlerbehaftete Messdaten festgestellt, so werden die zugehörige Fahrt automatisch aussortiert, die Ergebnisse auf NaN (keine Zahl (engl. Not a Number)) gesetzt und der Dateiname in einer Log-Datei vermerkt.

## Beispielhafte Auswertungen im Rahmen des Projekts Assets4Rail

Das Analyse-Tool wurde erstmalig im Rahmen des Shift2Rail-Projekts „Assets4Rail“ [9] eingesetzt. Zwei der Ziele des Projekts sind die Entwicklung eines Brückenlärm-Monitoring-Systems und die Verbesserung sogenannter Brückendämpfer zur Reduzierung des Brückendröhnsens.

Als Brückendröhnen wird tieffrequenter Luftschall bezeichnet, welcher von der Brückenstruktur bei Anregung durch eine Zugüberfahrt abgestrahlt wird. Im Allgemeinen tritt Brückendröhnen insbesondere bei Stahlbrücken in Vollwandträger-Konstruktion und offener Fahrbahn (ohne Schotterbett) auf. [1]

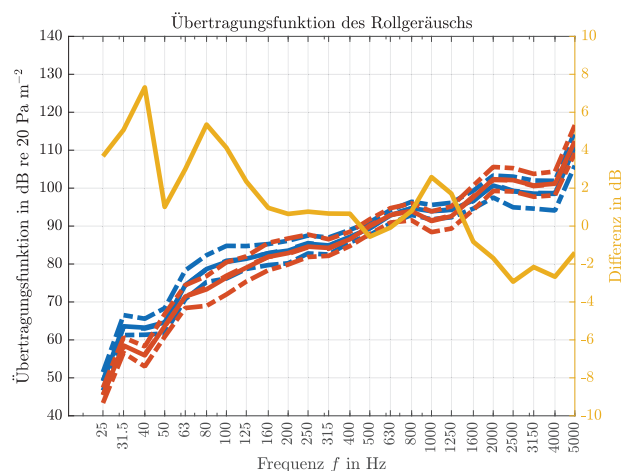
Im Projekt kam das Analyse-Tool zum Einsatz, um die akustischen Eigenschaften von Strecke und Fahrzeug zu bestimmen sowie die erzielte Lärminderung anhand der Rollgeräusch-Übertragungsfunktion zu quantifizieren. Hierfür wurden die Messdaten untersucht, die an zwei Eisenbahn-Stahlbrücken sowie zugehörigen Referenzstellen an freier Strecke vor und nach Einbau der Brückendämpfer erhalten wurden (siehe Abbildung 5). Die Messungen (siehe [10]) erfolgten hierbei unter normalem Zugbetrieb. Die typischen Geschwindigkeiten der verkehrenden Regionalzüge (alle vom gleichen Fahrzeugtyp) liegen hier in der Regel im dominanten Bereich des Rollgeräusch zwischen 80 km/h und 110 km/h.



**Abbildung 5:** Eisenbahn-Stahlbrücke in Pressig, Bayern, (Frankenwaldbahn) ausgerüstet mit Brückendämpfern der Schrey & Veit GmbH (aus [10]).

Ein beispielhaftes Ergebnis wird in Abbildung 6 gezeigt. Hier ist das Terzspektrum der Übertragungsfunktion des Rollgeräuschs vor und nach dem Einbau der Brückendämpfer sowie die Differenz des arithmetischen Mittels der Übertragungsfunktion dargestellt. Der Einbau der Brückendämpfer stellt die einzige wesentliche Änderung zwischen den beiden Messkampagnen dar, die die Übertragungsfunktion maßgeblich beeinflusst. Somit kann

die Lärminderungsmaßnahme im Terzfrequenzbandbereich quantifiziert werden. Es ergeben sich im tieffrequenten Bereich vor allem Reduktionen für die Terzbänder 40 Hz, 80 Hz und 100 Hz mit Werten bis zu 7 dB.



**Abbildung 6:** Terzspektrum der Übertragungsfunktion des Rollgeräuschs vor (blau) und nach Einbau (rot) der Brückendämpfer sowie Differenz (gelb); Arithmetisches Mittel (-) sowie 90 %- und 10 % Quantil (-).

Detaillierte Ergebnisse zu den durchgeführten Messungen werden im laufenden Jahr veröffentlicht.

## Fazit

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Analyse-Tool zur Bestimmung und Visualisierung verschiedener Rollgeräusch-Parameter vorgestellt, die die akustischen Eigenschaften von Gleis, Fahrzeug und Ausbreitungsweg charakterisieren. Darüber hinaus ist es möglich mit den berechneten Parametern, Lärminderungsmaßnahmen zu quantifizieren.

Als nächster Schritt in der Entwicklung des Analyse-Tools ist u. a. eine wagenweise Berechnung der Radrauheit geplant. Des Weiteren ist eine tiefere Validierung sowie eine Analyse des Einflusses verschiedener Einstellungsparameter in der Berechnung vorgesehen.

## Danksagung

Das Projekt Assets4Rail wurde vom Horizont 2020-Forschungs- und Innovationsprogramm der EU unter Grant Agreement Nr. 826250 gefördert. Dafür bedankt sich das Team der Projekt-Bearbeitenden. Der Inhalt dieses Dokuments spiegelt nur die Ansicht der Autoren wider.

## Literatur

- [1] Lutzenberger, S., Stiebel, D., Gerbig, C. und Wetschreck, R. G.: „Luftschall aus dem Schienenverkehr“ in Müller, G. und Möser, M., Hg., Luftschall aus dem Schienenverkehr. Fachwissen Technische Akustik, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2017

- [2] DIN CEN/TR 16891 (DIN SPEC 38451):2017-03, Bahnanwendungen – Akustik – Messverfahren für kombinierte Rauheit, Gleisabklingraten und Übertragungsfunktionen, 2017.
- [3] DIN EN 15461:2011-01, Bahnanwendungen – Schallemission – Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen, 2011.
- [4] DIN EN 15610:2009-08, Bahnanwendungen – Geräuschemission – Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch, 2009.
- [5] E DIN EN 15610:2017-10, Bahnanwendungen – Akustik – Messung der Schienen- und Radrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen, 2017.
- [6] Janssens, M.H.A., Dittrich, M.G., de Beer, F.G., und Jones, C.J.C.: „Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay“, In: Journal of Sound and Vibration 293 (2006), S. 1007-1028.
- [7] van Lier, A.A., und Biegstraaten, F.: The measurement, analysis and presentation of wheel and rail roughness, NS Technisch Onderzoe, Utrecht (NL) report NSTO/97/9571011/005, 1997.
- [8] Krump, G., Heckelmüller, H. und Kendl, F.: TDR Einzahlwert zur Charakterisierung der dynamischen Oberbausteifigkeit, ZEVrail 144(05), 2020.
- [9] Assets4Rail, URL: <http://www.assets4rail.eu/>.
- [10] Hanisch, T., Gramowski, C., Ralbovsky, M. und Rudolf, R.: „Assets4Rail Deliverable D1.2.1: Technical Report for WP 1.2 Bridge Noise Measurements in Pressig, Germany, before and after the installation of bridge noise dampers“, non-public, 2021.