

## Messung von Schienenschallintensität

Christian Czolbe<sup>1</sup>, Hansrudolf Graf<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PROSE AG, 8400 Winterthur, christian.czolbe@prose.one

<sup>2</sup> PROSE AG, 8400 Winterthur, hansrudolf.graf@prose.one

### Ausgangslage und Idee

Fahrgeräusche von Schienenfahrzeugen werden nach EN ISO 3095 während einer Vorbeifahrt mit konstanter Geschwindigkeit gemessen. Dabei trifft an den seitlich zum Gleis angeordneten Mikrofonen stets der Gesamtschall ein. Im Rollgeräusch ist eine Trennung der Schallanteile vom Rad, Schiene und Oberbau in der Praxis nur schwer möglich, da sich einerseits Quellen sehr schnell bewegen und andererseits die Mittelungsintervalle bei hohen Geschwindigkeiten extrem kurz sind. Die klassische p-p Intensitätsmesstechnik in geschlossenen Messsystemen ist hierfür zu träge und weniger gut geeignet. Das hier vorgestellten Messverfahren für den Schienenschall ermöglicht mit Hilfe eines zusätzlichen Mikrofons und eines Beschleunigungssensors die Schienenschall-Intensität an einer Messstelle zu ermitteln.

An einem Messabschnitt in der Schweiz wurde 2017 ein Vergleich der Schallintensitätsverfahren an benachbarten Gleisabschnitten durchgeführt.

### Schallintensität aus Druckmessungen p-p

Mittels Intensitätssonde bestehend aus zwei gegenüber angeordneten Mikrofonen im festen Abstand zueinander.

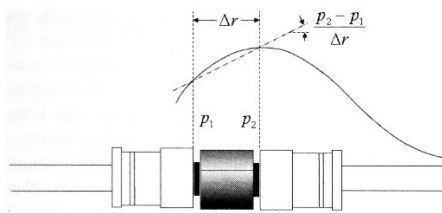


Abbildung 1: p-p Intensitätssonde

Als Messgrößen wird der Schalldruck  $p_1$  und  $p_2$  etwa 40cm von der Schiene entfernt gemessen.

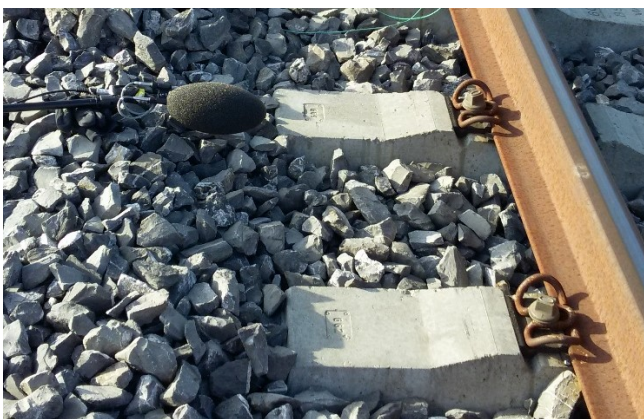


Abbildung 2: Schallintensität aus p-p

Das Distanzstück von 12mm lässt einen Frequenzbereich von 125 Hz bis 5000 Hz für die Auswertung zu.

Bestimmung der Phasenlage und der Schallschnelle  $v$  aus den Schalldruckmessungen. Intensität ist das Skalarprodukt aus Schalldruck und Schallschnelle in Richtung der Sonde.

$$I(\theta) = p \cdot v(\theta) = -\frac{p_1 + p_2}{2 \cdot \rho \cdot \Delta r} \int (p_2 - p_1) dt \quad \text{Gl (1)}$$

Die Berechnung des Intensitätsspektrums erfolgt in den meisten Geräten im Frequenzbereich über das Kreuzleistungsdichtespektrum. Für die Messungen wurde ein Schallpegelmessgerät Bruel & Kjaer Typ 2260 verwendet.

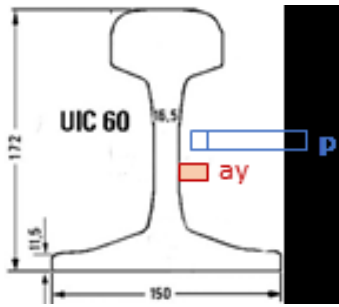
### Schienenschallintensität aus Druck & Schnelle

Ein Mikrofon misst den Schalldruck in unmittelbarer Nähe zu einem Beschleunigungssensor am Schienensteg.



Abbildung 3: Schienenschallintensität p-v

Als Messgrößen werden der Schalldruck  $p$  und Schienensteg-Beschleunigung  $a_y$  in seitlicher Richtung gemessen und parallel zu den Vorbeifahrtsmessungen mit Achssignalen aufgezeichnet.



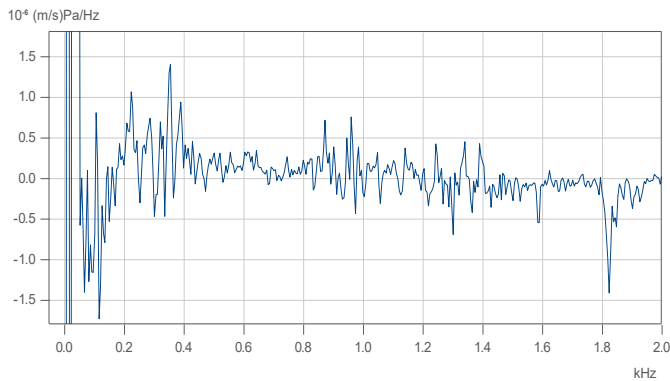
**Abbildung 4:** Beschleunigungssensor ay und Mikrophon p für Schienenschall-Intensität aus p-v

Durch Integration von ay kann die Schwingungsschnelle der Schiene vy bestimmt werden.

Nun wird im Frequenzbereich das Kreuzleistungsdichtespektrum aus p und vy berechnet.

$$I_{PVy}(f) = P(f) \cdot V \cdot y(f) \quad \text{Gleichung (2)}$$

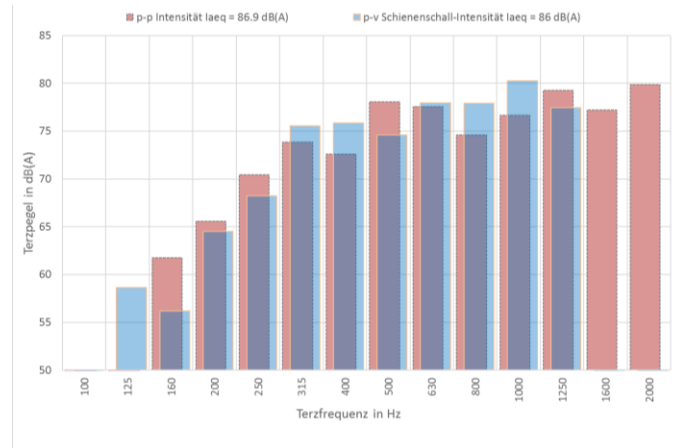
Die lineare Schallintensität ist der Realteil vom Kreuzleistungsdichtespektrum, wobei die reellen Anteile Wirkleistung und die imaginären Anteile Blindleistung sind. Anschließend muss das Schmalbandspektrum noch in ein Terzspektrum umgerechnet werden, welches dann entsprechend die positiven und negativen Terzen für die Schallintensitäten beinhaltet.



**Abbildung 5:** Kreuzleistungsdichtespektrum aus p-v

### Schallintensität vs. Schienenschall

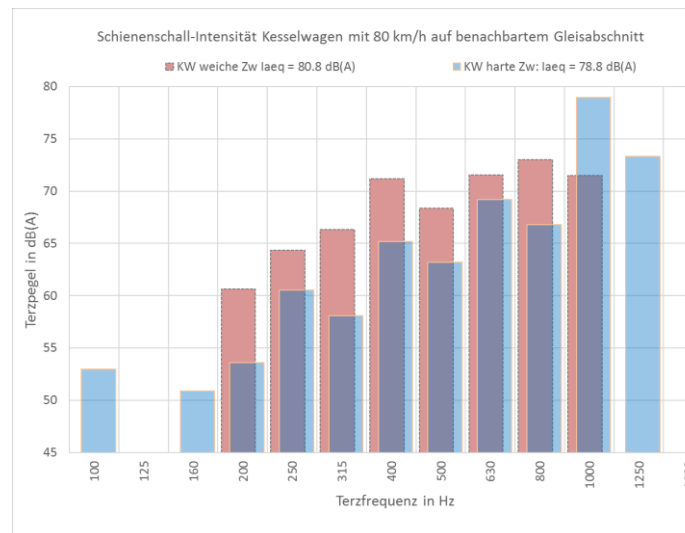
Im Rahmen eines Typentests von Kesselwagen wurde Schallintensität p-p und Schienenschallintensität p-v unmittelbar neben dem Messquerschnitt gemessen. Der Güterzug bestand aus 10 Wagen und einer Lok und war etwa 150m lang. Bei 80 km/h ergibt sich dann eine Mittelungsdauer von etwa 8s. Die Schienenbeschleunigungen wurden dabei mit 5 kHz abgetastet, was eine Analysebandbreite bis auf zur 2000 Hz Terz ermöglicht. Die untere Grenzfrequenz wird durch das Distanzstück der p-p Intensitätssonde bestimmt und liegt bei 125 Hz. Nachfolgendes Diagramm zeigt die ermittelten Schallintensitäten A-bewertet als Terzspektrum. Die Summenpegel beider Verfahren liegen weniger als 1 dB auseinander.



**Abbildung 6:** Schallintensität vs. Schienenschallintensität während der Vorbeifahrt eines Kesselwagens mit 80 km/h

### Vergleich von Gleiseigenschaften

Die Eigenschaften der Gleise haben mitunter auch erheblichen Einfluss auf die Fahrgeräusche. Wird die Schiene weich gelagert, z.B. bei der sogenannten festen Fahrbahn oder bei Betonschwellen auf weicher Zwischenlage, so verringert sich die längenbezogene Dämpfung (Track-Decay-Rate) und der Schienenschall nimmt zu. Bei Vergleichsmessungen auf benachbarten Schottergleisen fallen die Vorbeifahrpegel bei weicher Zwischenlage i.d.R. um 2-3 dB höher aus als bei harter Zwischenlage. In der Schienen-Schallintensität ist dies durch einen um 2 dB höheren Summenpegel ersichtlich. Interessant sind allerdings die Verschiebungen im Frequenzbereich, während bei harter Zwischenlage die Energie überwiegend in der 1000 und 1250 Hz Terz liegt, so verschiebt sie sich bei weicher Zwischenlage zu tiefen Terzfrequenzen zwischen 200 und 800 Hz hin.

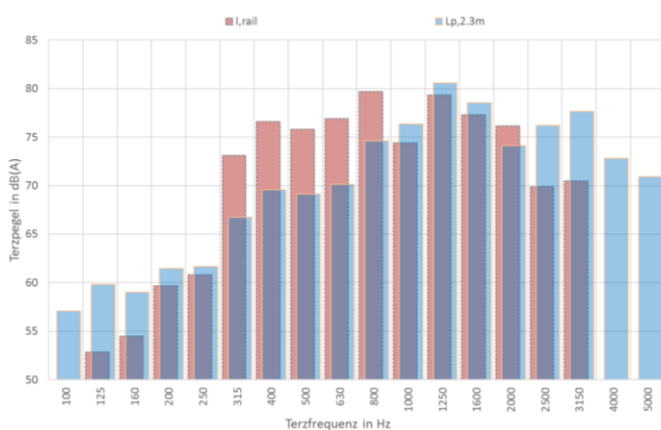


**Abbildung 7:** Schienenschallintensität während der Vorbeifahrt eines Kesselwagens mit 80 km/h auf unterschiedlichen Oberbauten am benachbarten Gleisabschnitt.

## Trennung von Rollgeräuschkomponenten

Bei investigativen Messungen werden neben dem Mikrofon in 7.5m Entfernung zur Gleismitte meist auch gleisnahe Mikrofone verwendet, um somit Drehgestelle oder Radsätze besser im Pegelzeitverlauf zu separieren. Im Frequenzspektrum eines gleisnahen Mikrofons ist das Rollgeräusch immer als Summe von Rad- und Schienenschall abgebildet. Kann der Anteil des Schienenschalls durch diese Methode vom Rollgeräusch subtrahiert werden?

Im Januar/Februar 2018 wurden während eines Typentestversuchs solche Messungen durchgeführt und können nun im Vergleich Schienenschall-Intensität zu Schalldruckpegeln in 2.3m Abstand gegenübergestellt werden.



**Abbildung 8:** Schienenschallintensität  $I_{\text{rail}}$  und Schalldruckpegel  $L_{p,2.3m}$  während der Vorbeifahrt eines Kesselwagens mit 80 km/h.

Der Vergleich unterschiedlicher Schallgrößen in Abbildung 6 ist eigentlich unzulässig, aber die Umrechnung in Schalleistung oder Schalldruck in einem bestimmten Abstand ist für den Schienenschall nicht einfach durchzuführen. Man kann jedoch bereits erkennen, dass die Terzbänder 315 bis 800 Hz offenbar von der Schiene ausgehen, während die Schallanteile ab 1000 Hz eher vom Rad abgestrahlt werden.

## Zusammenfassung

Es wurde eine Messmethode für Fahrgeräuschmessungen von Schienenfahrzeugen entwickelt, die es mit konventionellen Sensoren erlaubt, die Schienenschall-Intensität zu bestimmen. Die Mittelungsdauer kann dabei sehr kurz gewählt werden und ist sowohl für Ganzzüge, Einzelwagen oder Fahrgestelle, als auch für hohe Geschwindigkeiten geeignet. Die Abtastfrequenz sollte das 2.5fache der höchste Analyse-Terzfrequenz betragen.

Es konnte gezeigt werden, dass die Terzspektren von klassischer p-p Intensität kaum von der p-v Schienenschall-Intensität unterscheiden (Abbildung 2). Die Methode liefert mit geringem technischen Aufwand plausible Ergebnisse.

Der akustische Unterschied zwischen Oberbauarten kann bezgl. Schienenschallanteil mit dieser Methode untersucht werden. Ein Vergleich benachbarter Abschnitte mit harter und weicher Zwischenlage bestätigt die Erkenntnisse über die Lärmzunahme bei weichen Zwischenlagen.

Als nächstes sollte die Schienenschall-Intensität in eine Schalleistung umgerechnet werden. Hierzu sind noch einige Fragen zu klären:

- Schiene wird als Linienschallquelle oder Reihe von Punktschallquellen betrachtet?
- Strahlerart der Schiene: Linien Dipol lateral, omnidirektional Schallquelle für die vertikale Bewegung – siehe Thompson, S.191 ff [2].
- Schienenabstrahlung in den Halbraum berücksichtigen.
- Beitrag der gegenüberliegenden Schiene zum Rollgeräusch am gleisnahen Mikrofon?
- Über welche Länge/Fläche ist der Schienenschall zu mitteln?
- Ausbreitung über die Länge ist Frequenzabhängig und hängt mit der Track-Decay-Rate zusammen. Diese muss berücksichtigt werden.

Ist die Schienenschalleistung bekannt, so kann der Anteil vom Rollgeräusch subtrahiert werden. Damit lassen sich akustische Effekte und Lärminderungspotentiale sowohl an den Fahrzeugen als auch am Gleis besser bestimmen.

Im Rahmen der europäischen Lärmberechnungsmethoden CNOSSOS-EU [3] werden ebenso Maßnahmen zur Schallquellenseparation untersucht. Für den Schienenschall ist hier ein Linienarray im Nahfeld vorgesehen und für den Radschall ein zweidimensionales Mikrofonarray im Fernfeld. Beide Verfahren bedeuten einen deutlich höheren Aufwand sowie bei der Messung als auch der Auswertung, als das hier vorgestellte Verfahren der Schienenschallintensität.

## Literatur

- [1] Möser, Messtechnik der Akustik, S.350, Springer 2010
- [2] Thompson, Railway Noise and Vibration, Elsevier 2009
- [3] CNOSSOS-EU, Common Noise Assessment methods in Europe, JRC Reference reports 2012