

# Der Doppler-Effekt im Körperschall bei Kurvengeräuschen am Fahrweg von Straßenbahnen

Rudi Volz

Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik, TU Berlin, 10587 Berlin, Deutschland,

Email: [rudi.volz@tu-berlin.de](mailto:rudi.volz@tu-berlin.de)

## Einleitung

Im Rahmen des vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens "Leiser Verkehr - Kurvengeräusche: Entwicklung von anwendungsreifen und wirksamen Maßnahmen zur Reduzierung von Kurvenquietschen an Rad und Schiene" wurden vom Institut für Strömungsmechanik und Technische Akustik Körperschallmessungen am Fahrweg bei der Vorbeifahrt von Straßenbahnzügen durchgeführt.

Dabei wurde festgestellt, dass das Kurvenquietschen im Luftschall bei der Vorbeifahrt am Mikrofon zu einer Frequenzverschiebung aufgrund des Doppler-Effekts führt. Erste Ergebnisse wurden auf der letzten DAGA 2007 in Stuttgart gezeigt [1]. Auch im Körperschall schien der Doppler-Effekt aufzutreten. Dies war Gegenstand der folgenden Untersuchung.

## Messanordnung

Die Messungen fanden in einer Kurve auf dem Schienennetz des Verkehrsbetreibers "moBiel" in Bielefeld im April 2006 statt. Eine genauere Beschreibung findet sich in [1].

Der Messzug vom Typ MS8C fuhr mit drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (10, 20 und 30 km/h) an der Messstelle vorbei. An der Schiene wurde der Schnellepegel am kurveninneren Gleis erfasst. Dabei befanden sich die Aufnehmer im Bereich der Schwelle und in Schwellenfachmitte (Schwellenfachabstand: 60 cm). Abbildung 1 zeigt den Querschnitt des Schienenprofils [2] und die Anordnung der Messpunkte am Schienenkopf der kurveninneren Schiene.

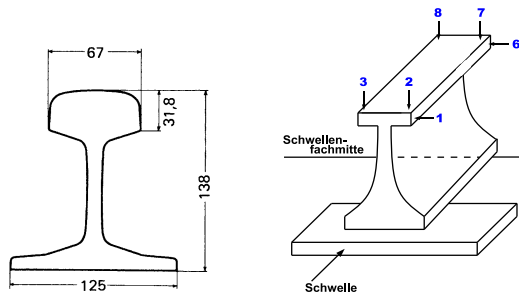


Abbildung 1: Schienenprofil S 41 (links) – ausgewählte Körperschallmesspunkte am Schienenkopf.

## Ermittlung der Frequenzverschiebung

Die Darstellung des Schnellepegels während der Vorbeifahrt in Farbkonturplots ist ausführlich in [1] dargestellt. Ausschnitte im Frequenzbereich zeigten, dass der Grundton des Kurvenquietschens während der Vorbeifahrt beim Passieren des Drehgestells mit dem Messradsatzes markant sinkt. Ein Beispiel für eine Vorbeifahrt mit 20 km/h ist für den Messpunkt 6 (siehe Abbildung 1) in Abbildung 2 für zwei unterschiedlich große Fensterlängen dargestellt (Rechteck-

fenster, 50% Overlap). Im linken Bild ist der Abfall der Frequenz über die Zeit gut zu erkennen. Will man jedoch eine gute Frequenzauflösung erhalten, ist ein längeres Zeitfenster notwendig (rechtes Bild). Dabei geht jedoch die Zeitauf- lösung verloren.

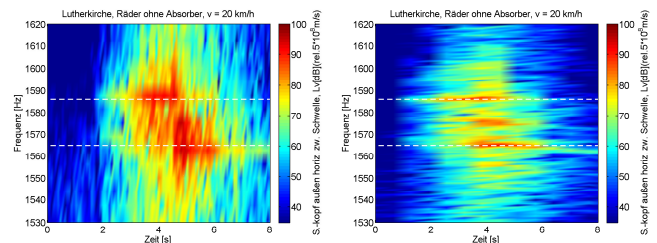


Abbildung 2: Ausschnitt im Frequenzbereich des Schnellepegels von Messpunkt 6, Fensterlänge 4.096 Stützstellen (links) bzw. 32.768 Stützstellen (rechts).

Für die Auswertung der Frequenzverschiebung wurden gemittelte Spektren verwendet. Ein Beispiel ist in Abbildung 3 dargestellt.

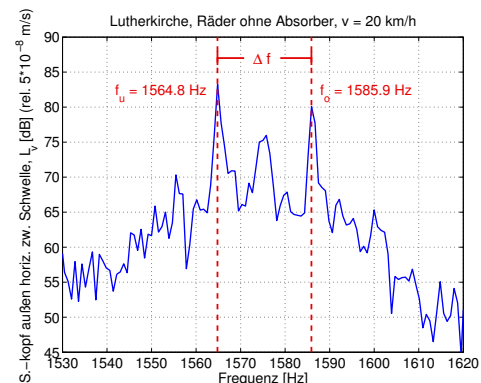


Abbildung 3: Gemitteltes Spektrum einer Vorbeifahrt (20 km/h, Messpunkt 6).

Die Frequenzverschiebung ist aus der Grafik deutlich zu erkennen. Der Grundton des Quietschens sinkt in dem betrachteten Beispiel von 1.585,9 Hz auf 1.564,8 Hz.

Die Frequenzänderung durch den Doppler-Effekt ergibt sich nach Gleichung (1).

$$f_D = f \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right) \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

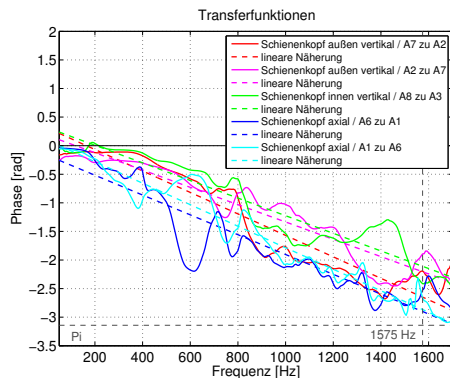
Dabei ist  $f$  die Frequenz der unbewegten Quelle,  $v$  die Geschwindigkeit, mit der sich die Quelle auf den Betrachter zu bzw. von ihm weg bewegt und  $c$  die Schallausbreitungsgeschwindigkeit.

Da sich bei der Vorbeifahrt die Quelle zuerst auf den Messpunkt zu und dann von ihm weg bewegt, ergibt sich die gesamte Frequenzverschiebung  $\Delta f$  von  $f_o$  zu  $f_u$  aus Gleichung (2). Es wurden 15 Vorbeifahrten ausgewertet. Aus Gleichung (2) kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit berechnet werden.

$$c = \frac{v \cdot (f_o + f_u)}{f_o - f_u} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

## Phasendifferenz aus Transferfunktionen

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit besteht in der Ermittlung der Phasendifferenz aus den durchgeführten Transferfunktionsmessungen mittels Impulsanregung mit einem Hammer. Die Anregung fand dabei in vertikaler (zwischen Aufnehmer 2 und 3 bzw. 7 und 8 in der Mitte des Schienenkopfes) und axialer Richtung (gegenüber von Messpunkt 1 bzw. 6) statt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

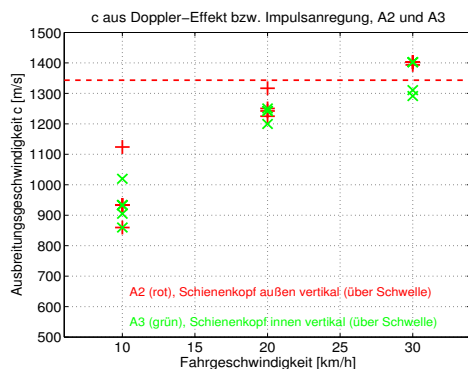


**Abbildung 4:** Phasendifferenz zwischen den Messpunkten über und zwischen der Schwelle aus Messungen der Impulsanregung.

Die Phasendifferenz  $\varphi$  aus dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Frequenz des Quietschens bei 1.575 Hz kann zur Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit nach Gleichung (3) herangezogen werden.

$$c = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{\varphi} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

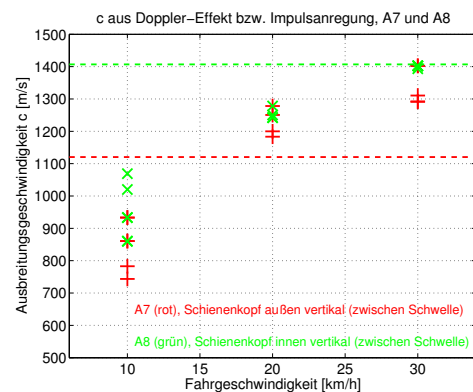
Die aus der Frequenzverschiebung und den Phasendifferenzen ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind für die jeweiligen Messpunktpaare 2 und 3, 7 und 8 (vertikal) sowie 1 und 6 (axial) in den Abbildungen 5 bis 7 dargestellt.



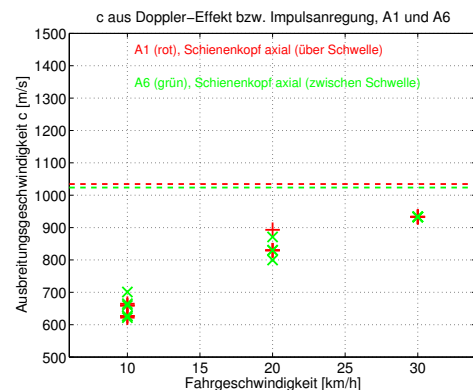
**Abbildung 5:** Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  für die Messpunkte 2 und 3 (vertikal). Einzelne Punkte aus Doppler-Effekt, gestrichelte Linie: aus Phasendifferenz.

Die Abbildungen zeigen, dass die beste Übereinstimmung der durch die beiden Methoden berechneten Ausbreitungsgeschwindigkeiten bei der höchsten untersuchten Fahr-geschwindigkeit von 30 km/h auftritt. Die Streuung der Ausbreitungsgeschwindigkeit aus den Doppler-Effekt Messun-

gen sind, bezogen auf den gleichen Messpunkt und die gleiche Fahr-geschwindigkeit, gering. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten bei den vertikal angeordneten Messpunkten (A2, A3, A7 und A8) liegen (bei den beiden höheren Fahr-geschwindigkeiten) bei 1.200 bis 1.400 m/s. Bei den axial angeordneten Messpunkten (A1 und A6), liegen diese Werte bei lediglich 800 bis 900 m/s (aus Transferfunktionen berechnet: 1.000 m/s). Da im Bereich von 1.500 Hz bereits mehrere Wellentypen in der Schiene vorliegen [3], ist zu vermuten, dass je nach Messrichtung (d.h. axial oder vertikal) unterschiedliche Wellentypen dominieren.



**Abbildung 6:** Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  für die Messpunkte 7 und 8 (vertikal).



**Abbildung 7:** Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  für die Messpunkte 1 und 6 (axial).

## Zusammenfassung

Der Doppler-Effekt als Ursache der Frequenzverschiebung des Kurvenquietschens bei der Zugvorbeifahrt konnte mit den Ergebnissen der Transferfunktionsmessungen bestätigt werden.

## Literatur

- [1] Volz, R., Feldmann, J.: Luft- und Körperschallmessungen am Fahrweg von Straßenbahnen bei Kurvenfahrt (Kurvenquietschen). DAGA 2007 in Stuttgart, (2004)
- [2] Fastenrath, F.: Die Eisenbahnschiene. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1977
- [3] Scholl, W.: Darstellung des Körperschalls in Platten durch Übertragungsmatrizen und Anwendung auf die Berechnung der Schwingungsformen von Eisenbahnschienen. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1986