

Die Beeinflussung des Rollgeräusches durch Fehlstellen an der Schiene

Karlotta Proschitzki¹, Katja Stampka¹, Benjamin Baasch², Ennes Sarradj¹

¹ TU Berlin, Fachgebiet Technische Akustik, Einsteinufer 25, 10587 Berlin, karlotta.proschitzki@tu-berlin.de

² DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin, benjamin.baasch@dlr.de

Einleitung

Schallemissionen von Schienenfahrzeugen werden im Wesentlichen durch Aggregatgeräusche (bei ca. 60 km/h), das Rollgeräusch (bei ca. 60 bis 300 km/h) und aerodynamische Geräusche (bei über 300 km/h) bestimmt [7]. Das Rollgeräusch wird insbesondere beeinflusst durch kleine Rauheiten auf der Lauffläche, parametrische Anregung durch die Lagerung und die variierende Steifigkeit der Schiene, Kopplungsmechanismen zwischen der Schienen- und Radantwort sowie die Kontaktkraft.

Es wurde eine Messreihe im Juni 2020 am Gleisnetz des Braunschweiger Binnenhafens in Zusammenarbeit des DLR (Institut für Verkehrssystemtechnik) und der TU Berlin (Fachbereich Technische Akustik) durchgeführt. Die Messungen beinhalten umfangreiche Untersuchungen zur akustischen Charakterisierung der Gleisanlage sowie Überfahrtsmessungen. Hierbei wurde an der Schiene mit Beschleunigungsaufnehmern und an der Zugachse mittels Achslagerbeschleunigungssensoren gemessen sowie die Luftschallabstrahlung neben dem Gleis bestimmt. Ziel der Messungen war es die Wirkung von Fehlstellen an Schienen auf das Rollgeräusch systematisch zu untersuchen und eine Methodik zu bestimmen, um den Einfluss dieser mit synchronen Messungen an der Fahrzeugachse sowie dem Gleis zu erkennen. Hierzu sollten die Messungen miteinander entlang einer gemeinsamen Zeitachse synchronisiert und verglichen werden.

Als Referenz wurden die Messungen an einem weitestgehend homogenen Gleisabschnitt durchgeführt sowie an zwei ausgewählten Fehlstellen, bei denen Schweißnähte an der Schiene, ein Wechsel der verbauten Schwellenart und Lochbohrungen im Schienenprofil auftraten.

Im Weiteren werden der verwendete Messaufbau, die untersuchten Fehlstellen, der allgemeine Gleiszustand am Messort, die vorgenommenen Überfahrtsmessungen und die Synchronisierung der Messdaten vorgestellt.

Messungen

Für die Messungen wurde ein etwa 80 m langer Gleisabschnitt betrachtet. In diesem wurden die Schwellen ausgehend von einem homogenen Abschnitt, dem gewählten Referenzschienenabschnitt, nummeriert. Im Vergleich zum Referenzschienenabschnitt wurden zwei Fehlstellen betrachtet. Fehlstelle 1 weist eine Lochbohrung und einen Schienenstoß in der linken Schiene auf (siehe Abbildung 1). An Fehlstelle 2 tritt ein Schienenstoß auf und außerdem gibt es einen Wechsel der verbauten Schwellenart (siehe Abbildungen 2). Zunächst wurden Untersuchungen der Gleisbeschaffenheit

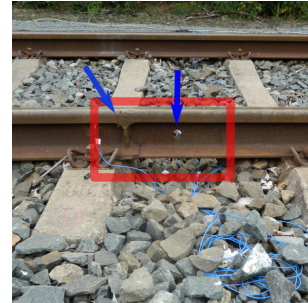


Abbildung 1: Fehlstelle 1: Loch in der Schiene und Schienenstoß (jeweils mit blauem Pfeil gekennzeichnet)

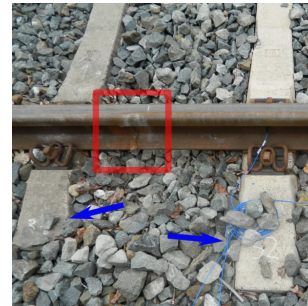


Abbildung 2: Fehlstelle 2: Schienenstoß (rot umrandet) und Schwellenwechsel (mit blauen Pfeilen gekennzeichnet)

durch Messungen der Schwellenabstände, des Schienenabriebs, der Schienenrauheiten, der Steifigkeit des Oberbaus sowie des Abklingverhaltens der Schiene durchgeführt. Anschließend erfolgten insgesamt etwa 50 Vorbeifahrtsmessungen mit einer Lok und einem Zweigeigefahrzeug bei Geschwindigkeiten von bis zu 30 km/h. Bei der Lok handelt es sich um eine Rangierlok mit einem Gewicht von 40 t (Firma: Maschinenbau Kiel), das RailDriVE[®] ist ein Mercedes Vario mit einem Gewicht von etwa 7 t. Der Antrieb des RailDriVE[®] erfolgt bei Schienenfahrt über die Straßenreifen der hinteren Achse. Diese übertragen Antriebs- und Bremskräfte durch Reibschluss zwischen den Gummireifen und den Reibtrommeln der hinteren Schienenräder. Weitere Informationen zum Messsystem des DLR in Lok und RailDriVE[®] sind beispielsweise [5] zu entnehmen.

Messungen zur Gleischarakterisierung

Ein Fokus bei den Messungen zur Gleischarakterisierung lag auf den Steifigkeitsmessungen. Ziel dieser war es die Federeigenschaften des Oberbaus abzubilden. Dazu wurden Impulsantworten der Struktur vertikal über der Schwelle bzw. in der Schwellenmitte gemessen. Ziel war es Unterschiede zwischen verschiedenen Schwellen zu charakterisieren. Somit konnten die

Feder-Dämpfereigenschaften des Systems bestehend aus verschiedenen Parametern (z. B. Steifigkeiten des Schotters und der Zwischenlagen) näherungsweise bestimmt werden. Für die Messung der Steifigkeit wurde ein Beschleunigungsaufnehmer am Messpunkt mit einem Magneten an der Schiene angebracht. Unmittelbar neben dem Aufnehmer wurde mit dem Impulshammer sechsmal angeschlagen. Die Messung wurde für die Schwellen im Bereich der Fehlstelle 1 in den Schwellenfachmitten und im Bereich der Fehlstelle 2 über den Schwellen durchgeführt. Außerdem wurde am Referenzschienenabschnitt sowohl an der linken als auch an der rechten Schiene an mehreren Schwellen gemessen. Die Messung der Gleisabklingraten erfolgte nach DIN EN 15461 [4] mit drei Messpunkten und Mitführen eines weiteren Beschleunigungsaufnehmers an der Anschlagposition.

Die Messung der Schienenrauheit wurde mit dem Messgerät m|rail von Müller BBM für den gesamten betrachteten Schienenabschnitt (ca. 80 m) sowohl auf der linken als auch auf der rechten Schiene realisiert. Die Messungen wurden nach DIN 15610 [3] je Schiene dreimal auf unterschiedlichen Messspuren wiederholt.

Überfahrmessungen

Ergänzend wurden etwa 50 Überfahrmessungen durchgeführt. Diese beinhalteten Achslagerbeschleunigungsmessungen an beiden Messfahrzeugen mittels Sensoren, die vorne rechts und links an auf die Achslager geklebte Metallplatten geschraubt sind. Das verwendete Messsystem in den Fahrzeugen benutzt zur Erfassung der dynamischen Fahrzeugreaktionen breitbandige (0,8 Hz bis 8000 Hz) triaxiale Achslagerbeschleunigungssensoren. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass Unregelmäßigkeiten des Schienenlängsprofils bzw. der Schienenrauheit zu Vibrationen führen, die sich in den Achslagerbeschleunigungsdaten widerspiegeln. [1] Außerdem erfolgte die Messung der Luftschallabstrahlung mit zwei Mikrofonen in Anlehnung an DIN EN ISO 3095 [2]. Die Schalldrücke wurden zeitsynchron zu der Messung mit den Beschleunigungsaufnehmern erfasst. Es wurden nur zwei Mikrofone verwendet, da die Verwendung eines dritten Mikrofons im geforderten Abstand bei der Fehlstelle 1 aufgrund eines Gebüschs nicht möglich war. Ein Mikrophon wurde am Referenzschienenabschnitt positioniert, das andere an der Fehlstelle 2.

Parallel wurden die genauen Überfahrgeschwindigkeiten mit Lichtschranken bestimmt. Die Radrauhigkeiten an den vier Rädern des RailDrive® wurden mit dem Messgerät m|wheel von Müller BBM nach DIN 15610 [3] gemessen.

Während der Überfahrten wurden insgesamt 27 Beschleunigungsaufnehmer an der Schiene geklebt. Die meisten dienten der Erfassung der vertikalen Schienenreaktionen, einige jedoch auch der lateralen. Der Aufbau der Beschleunigungsaufnehmer sowohl am Referenzschienenabschnitt als auch an beiden Fehlstellen sind den Abbildungen 3, 4 und 5 zu entnehmen.

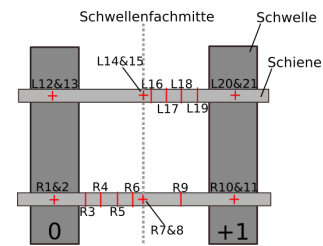


Abbildung 3: Positionen der Beschleunigungsaufnehmer am Referenzschienenabschnitt zwischen der nullten und ersten Schwelle; die weiteren Beschriftungen geben die Benennung der Beschleunigungsaufnehmer an (I: vertikal, +: vertikal und lateral)

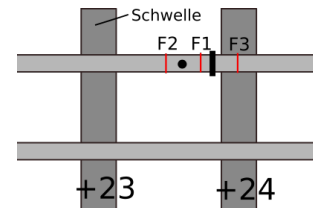


Abbildung 4: Positionen der Beschleunigungsaufnehmer an der Fehlstelle 1 zwischen der 23. und 24. Schwelle; die weiteren Beschriftungen geben die Benennung der Beschleunigungsaufnehmer an

Synchronisierung der Messdaten

Um die Messdaten an den Fahrzeugachsen mit den Messungen am Gleis vergleichen zu können, war eine zeitliche Synchronisierung notwendig. Hierbei wurde eine kostengünstige Synchronisierung der Messrechner mittels UKW-Empfängern, Analogradios vom Typ City 31 PR 3201 der Firma GRUNDIG, gewählt. Dazu wurde das Signal eines Radiosenders auf allen unabhängigen Messsystemen als zusätzlicher Kanal aufgezeichnet. Das Radiosignal bietet den Vorteil, dass es sich ähnlich wie eine Maximalfolge nicht wiederholt. Da ein vorheriger Einblick in die Radioaufzeichnungen weder am RailDrive® noch an der Lok möglich war, konnten entsprechende Korrekturen nicht durchgeführt werden. Hier wurden die Radios teilweise in der Hand gehalten, um einen Abstand zu den anderen Messsystemen zu gewährleisten und die gegenseitige Beeinflussung zu reduzieren. Leider zeigte sich jedoch, dass die Aufzeichnungen in der Lok während der Fahrt nicht gelungen sind, hier wäre eine Positionierung der Radioantenne außerhalb der Fahrerkabine notwendig

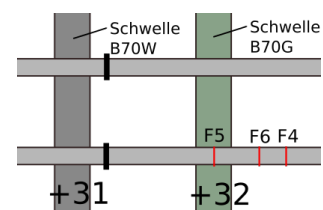


Abbildung 5: Positionen der Beschleunigungsaufnehmer an der Fehlstelle 2 zwischen der 31. und 32. Schwelle; die weiteren Beschriftungen geben die Benennung der Beschleunigungsaufnehmer an

gewesen.

Die verwendeten Messsysteme zeichnen die Daten mit unterschiedlichen Abtastraten auf. Um die Messdaten zu synchronisieren, müssen zunächst alle Daten auf eine gemeinsame Abtastratenumsetzung umgerechnet werden. Für diese Abtastratenumsetzung wird eine bandlimitierte *si*-Interpolation verwendet. Anschließend kann eine Kreuzkorrelation der Signale durchgeführt werden; Das Maximum der Korrelationsfunktion entspricht dem Versatz in Samples der beiden Signale zueinander. Dieser Versatz gilt nicht nur für die Radiosignale, sondern wird auch auf die Beschleunigungsdaten übertragen. Auch diese können somit entlang einer gemeinsamen Zeitachse synchronisiert werden. Nun kann auf ein Sample genau bestimmt werden, zu welchem Zeitpunkt die Überfahrt der jeweiligen Aufnehmer erfolgte. Hier ist im Weiteren eine beispielsweise zyklisch stationäre Betrachtung der Messdaten der Achslagerbeschleunigungsmessungen von Vorteil, um den dominanten Charakter des periodischen Radeinflusses zu reduzieren.

Ergebnisse

Im Weiteren wird auf die akustische Charakterisierung des verwendeten Gleises sowie die ersten Ergebnisse aus der Synchronisierung der Messdaten eingegangen.

Gleisabklingraten

Die gemessenen Gleisabklingraten sind in Abbildung 6 dargestellt. Sie liegen fast im gesamten betrachteten Frequenzbereich über der Grenzkurve nach DIN EN 15461 [4] und sind damit verhältnismäßig hoch. Es wird daher davon ausgegangen, dass eventuelle Reflexionen an den beiden betrachteten Fehlstellen lokal wirken und im nahen Umfeld derer abklingen. Insbesondere die *pinned-pinned*-Frequenz des Systems bei etwa 850 Hz ist gut zu erkennen. Bei dieser Frequenz entspricht etwa die halbe Biegewellenlänge in der Schiene dem Schwellenabstand und das System der periodisch gelagerten Schiene hat eine Resonanz.

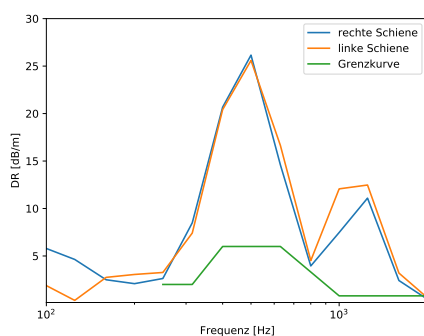


Abbildung 6: Vergleich der Terzbandspektren der gemittelten vertikalen Schienenabklingraten am linken und rechten Gleis unter Angabe der Grenzkurve nach DIN EN ISO 3095 [2]

Steifigkeitsmessungen

In Abbildung 7 und 8 sind die Ergebnisse der Messung der Steifigkeiten auf der Schwelle am Referenzschienenabschnitt und an der Fehlstelle 2

zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Fehlstelle 2 einen starken Einfluss auf die Mobilitäten und somit die Impulsantwort der Schiene hat. Dies ist nur in geringem Maße auch bei der Fehlstelle 1 aufgetreten. Resonanzfrequenzen wie die *pinned-pinned*-Frequenz sind im ganzen Messbereich weitestgehend konstant und weichen nur direkt an den Fehlstellen teilweise leicht ab. Um den Einfluss der Inhomogenitäten im Messbereich systematisch zu untersuchen, wären weitere Messungen notwendig. Vorerst kann jedoch festgehalten werden, dass Unterschiede in den Mobilitäten existieren und somit auch bei den weiteren Messungen, insbesondere bei den Fahrzeugüberfahrten, einen Einfluss spielen sollten.

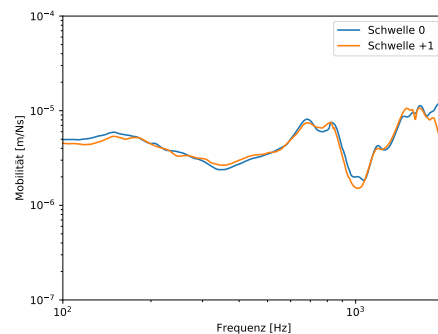


Abbildung 7: Frequenzverläufe der Absolutwerte der Mobilität am Referenzschienenabschnitt bei Messung auf den Schwellen 0 und 1 an der rechten Schiene

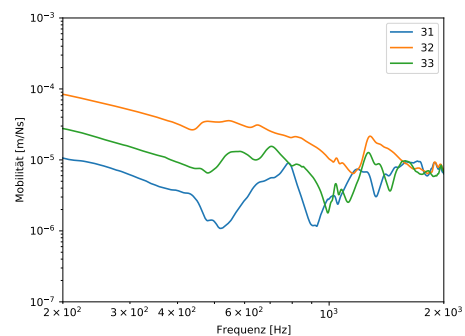


Abbildung 8: Frequenzverläufe der Absolutwerte der Mobilität an der Fehlstelle 2 bei Messung auf den Schwellen 31, 32 und 33 an der rechten Schiene

Weitere Messungen zur Gleischarakterisierung

Ergänzend wurden auch der Gleisabrieb und die Schwellenabstände dokumentiert, um ein genaues Bild der Gleisqualität am Tag der Messung zu erhalten. So betrug der mittlere Schwellenabstand im betrachteten Messbereich ca. 0,654 m mit einer Standardabweichung von 2,4%. Mit dem Schienenabrieb können Erkenntnisse über den Schienenverschleiß gewonnen werden. So gilt hier für die linke Schiene, dass die Höhe um 3 mm und die rechte Schiene um 1 mm abgenommen hat im Vergleich zu einer neuwertigen Schiene gleichen Bautyps [6].

Die Rauheitsmessungen ergaben, dass die rechte Schiene etwas rauer als die linke Schiene ist. Insgesamt liegen beide Schienenrauheitsspektren und auch die Radrauheitsspektren deutlich über der Vergleichskurve der akustischen Schienenrauheit nach DIN EN ISO 3095 [2]. Der Vergleich der Ergebnisse der Radrauheitsmessungen mit typischen Messwerten anderer Räder zeigt, dass die Räder des RailDrive® im Verhältnis eine sehr hohe Rauheit aufweisen. Dies kann auf die seltene Verwendung des RailDrive® zurückzuführen sein. Die Räder sind wahrscheinlich nicht eingefahren.

Überfahrtsmessungen

Über weite Frequenzbereiche haben die Beschleunigungsdichtepegel im Bereich der beiden Fehlstellen höhere Werte als das Referenzschwellenfach. Deshalb kann es gut sein, dass in diesen Bereichen auch eine höhere Schallabstrahlung auftritt. Es kann vermutet werden, dass an den Schienenstößen Reflexionen von Wellen in der Schiene auftreten. Dadurch können zusätzliche Resonanzen im Vergleich zum Referenzschwellenfach auftreten. Dies wird zum Beispiel an Fehlstelle 1 und 2 auch durch die Überfahrtsmessungen durch einen zusätzlichen Peak bei etwa 1,1 kHz erkennbar. Dies ist exemplarisch für eine Überfahrt mit der Rangierlok in der Abbildungen 9 zu sehen. Dort wird eine Messung an einer der Fehlstellen mit dem entsprechenden Positionsäquivalent im Referenzschwellenfach verglichen (siehe hierzu auch die Abbildungen 4 und 5).

Bei den Luftschallmessungen wird davon ausgegangen, dass hier durch die geringen Fahrzeuggeschwindigkeiten vor allem die Antriebsgeräusche gemessen wurden.

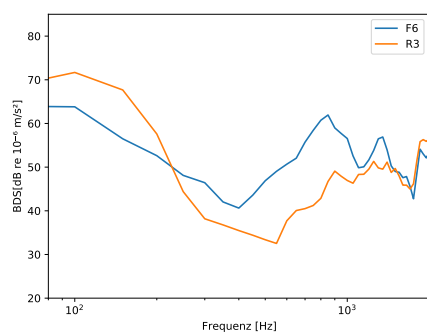


Abbildung 9: Gemitteltetes Beschleunigungsdichtespektrum für Überfahrten mit der Lok bei durchschnittlich 24,6 km/h, gemessen an der Fehlstelle 2 und dem Positionsäquivalent am Referenzschienenabschnitt

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Synchronisierung der Messsysteme konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Fehlstellen die Steifigkeit der Schiene beeinflussen. Diese sind entsprechend in den Messungen mit Beschleunigungsaufnehmern an der Schiene durch hochfrequente Peaks in den Mobilitäten und

Beschleunigungsdichtespektren erkennbar. So war es unter anderem möglich die Spektrogramme der Luftschallmessungen aus den streckenseitigen Beschleunigungsmessungen hervorzuzugan.

Durch die systematischen Messungen an den drei Messtagen liegt ein sehr umfangreicher Datensatz vor, der für zahlreiche Betrachtungen sowie die Validierung analytischer Gleismodelle verwendet werden kann (siehe beispielsweise [8]). Der Messbereich weist auch neben den zwei betrachteten Fehlstellen weitere Unregelmäßigkeiten auf. Nicht nur deshalb wären insbesondere Messungen an anderen Fehlstellen und mit höheren Geschwindigkeiten mit dem vorgestellten Messaufbau interessant, um so systematisch den Einfluss von Fehlstellen auf das Rollgeräusch zu kennen und von schienenseitigen Messungen auf die fahrzeugseitigen Auswirkungen schließen zu können und andersrum.

Dieses Projekt wurde vom Shift2Rail Joint Undertaking (JU) unter der Fördervereinbarung (Grant Agreement) No 826206 im Rahmen des EU-Förderprogramms für Forschung und Innovation Horizont 2020 gefördert.

Literatur

- [1] Baasch, B. und Groos, J. C. und Roth, M. H. und Havrila, P.: Detecting singular track defects by time-frequency signal separation of axle-box acceleration data. World Congress on Railway Research, Tokyo (2019)
- [2] DIN EN ISO 3095: Bahnanwendungen-Akustik-Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen. In: ISO 2005 (2014)
- [3] DIN EN 15610: Bahnanwendungen-Geräuschemission-Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch. In: Deutsche Fassung EN (2009)
- [4] DIN EN 15461: Bahnanwendungen-Schallemission-Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen. In: Deutsche Fassung EN 2008 (2011)
- [5] Groos, J. C. und Havrila, P. und Schubert, L. A.: In-service railway track condition monitoring by analysis of axle box accelerations for small to mid-size infrastructure operators. World Congress on Condition Monitoring, London (2017)
- [6] Hagen F. Lothes, (HFL). S49 Schienenmaße, URL: <https://www.hfl.de/index.php/mittlere-schienen/s49>
- [7] Müller, G. und Möser, M.: Luftschall aus dem Schienenverkehr. Fachwissen Technische Akustik, Springer Vieweg (2017), S. 16
- [8] Richter, I. und Proschitzki, K. und Stampka, K. und Sarradj, E.: Messtechnische Untersuchung der Aussagekraft von Transferrezeptanzen an Gleisanlagen im Vergleich mit analytischen Gleismodellen, DAGA, Wien (2021)