

# Quantifizierung der Flachstellenlästigkeit durch einen Pegelzuschlag

Manfred Liepert, Melissa Forstreuter, Christine Huth

Möhler+Partner Ingenieure AG, 86153 Augsburg, E-Mail:manfred.liepert@mopa.de

## Zielstellung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Umweltbundesamts zum Thema „Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums“ wurden Hörversuche zur Quantifizierung der Lästigkeit von Zugvorbeifahrten mit einer sogenannten Flachstelle (Radunrundheit) durchgeführt. Die Versuche hatten zum Ziel, die Lästigkeit akustisch auffälliger Flachstellengeräusche zu quantifizieren und eine Methode zur Lästigkeitsbewertung anhand eines Pegelzuschlags vorzuschlagen.

## Ausgangssituation

Mit der Umrüstung der auf dem deutschen Schienennetz verkehrenden Güterwagen auf lärmarme Bremssysteme wurde ein wesentlicher Beitrag zum Lärmschutzziel 2020 [1] des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, der Halbierung des Schienenlärms, geleistet. Die bis dahin üblichen „lauten“ Klotzbremsen mit Grauguss-Bremssohlen wurden durch sogenannte LL-Sohlen (bei der Nachrüstung) oder K-Sohlen (bei der Inbetriebnahme neuer Güterwagen) ausgetauscht. Die durch diese Bremssohlen reduzierte Aufrauung der Radlaufflächen ergibt in der rechnerischen Prognose nach Anlage 2 zur 16. BImSchV [2] eine Reduzierung des Rollgeräuschs um rd. 5 dB(A) bei 100 km/h auf durchschnittlichem Gleis. Messtechnisch können abhängig vom Gleiszustand auch noch deutlich höhere Pegelminderungen festgestellt werden.

Im Laufe der Umrüstung können in einem Zugverband Güterwagen mit LL-Sohlen oder K-Sohlen und GG-Sohlen gekoppelt sein. Aufgrund der unterschiedlichen Bremskurven (Abhängigkeit der Geschwindigkeit eines bremsenden Zuges vom Bremsweg) kann es dabei vermehrt zu einem Blockieren einzelner Radsätze kommen. Da die Räder aus einer weicheren Legierung bestehen als die Schiene, wird beim Gleiten des blockierten Rades auf der Schiene das weichere Rad abgenutzt und es entsteht eine sogenannte Flachstelle. Neben diesem Mechanismus der Flachstellenentstehung gibt es noch weitere Entstehungsmechanismen unterschiedlicher Radformfehler, die zu einem auffälligen Rollgeräusch führen. Zur Vereinfachung wird im Folgenden dabei nur von Flachstellen gesprochen.

Mit der erfolgreichen Reduzierung des ungestörten Rollgeräusches treten die Flachstellengeräusche nun subjektiv deutlicher in den Vordergrund und werden von Anwohnern als lästig empfunden. Die Geräusche werden in dieser Untersuchung durch einen Pegelzuschlag auf das Gesamtgeräusch bewertet. Die beiden Fragestellungen lauten:

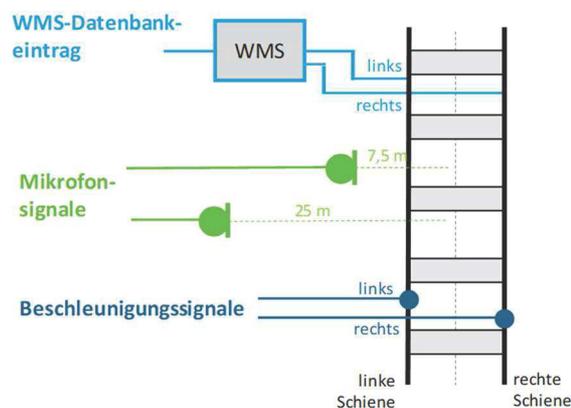
- Wie kann die Lästigkeit des Flachstellengeräusches quantifiziert werden?
- Ab wann ist die akustische Auffälligkeit einer Flachstelle subjektiv nicht mehr akzeptabel?

Die Quantifizierung der Lästigkeit soll dabei innerhalb des Rahmens der Beurteilungskenngrößen des Schall-Immissionsschutzes auf Basis von A-bewerteten Pegelgrößen erfolgen.

## Datengrundlage

Zur subjektiven Bewertung von Flachstellengeräuschen wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Hörversuche im Labor durchgeführt. Eine Befragung von Anwohnern zur Auffälligkeit von Flachstellengeräuschen erschien aufgrund des nicht vorhersagbaren Auftretens der Flachstellen als nicht zielführend.

Für die Hörversuche waren daher Aufzeichnungen von Zugvorbeifahrten bei einer gleichzeitigen Erkennung von Flachstellen im Zugverband erforderlich. Die Aufzeichnungen wurden über die Dauer von einem Monat an der Strecke 5510 München – Rosenheim zwischen Ostermünchen und Großkarolinenfeld bei km 53,7 auf dem östlichen Gleis durchgeführt. Die Messkampagne erfolgte in Kooperation mit der Müller-BBM Rail Technologies GmbH in unmittelbarer Nähe der Monitoring-Station des Eisenbahn-Bundesamts [3]. Zur Erkennung von Flachstellen kam das Wheel Monitoring-System (WMS) [4] zum Einsatz. Unabhängig davon wurden Beschleunigungssensoren am Schienenfuß und das Schallsignal zur Erkennung von Flachstellen verwendet. Die Mikrofonsignale wurden in 7,5 m Abstand und 25 m Abstand vom Messgleis aufgezeichnet.



**Abbildung 1:** Messaufbau zur Aufzeichnung von Zugvorbeifahrten bei gleichzeitiger Flachstellenerkennung an der Messstelle an der Strecke 5510

Während der Messdauer von einem Monat konnten insgesamt rund 3.000 Zugvorbeifahrten aufgezeichnet werden, davon 1.130 Güterzüge und 1.825 Personenzüge.

## Psychoakustische Hörversuche zur Lästigkeitsbestimmung

Aus den Aufnahmen von Zugvorbeifahrten wurde eine Auswahl selektiert, die anhand des WMS als Vorbeifahrt mit Flachstelle erkannt wurden und deren Tonaufzeichnung ein wahrnehmbares (d.h. auffälliges) Flachstellengeräusch enthielten.

### Versuchsordnung

Die Hörversuche zur subjektiven Bewertung der Flachstellengeräusche wurden in der Hörkabine der Möhler + Partner Ingenieure AG durchgeführt. Die Hörkabine zeichnet sich durch ein ruhiges und optisch neutrales Umfeld aus. Die Darbietung der Geräusche erfolgte über elektrostatische Kopfhörer der Lamda-Serie des Herstellers Stax. An den Hörversuchen nahmen insgesamt 20 Versuchspersonen im Alter zwischen 25 und 51 Jahren teil.



**Abbildung 2:** Hörkabine der Möhler + Partner Ingenieure AG; Darbietung der Geräusche über elektrostatische Kopfhörer der Firma Stax

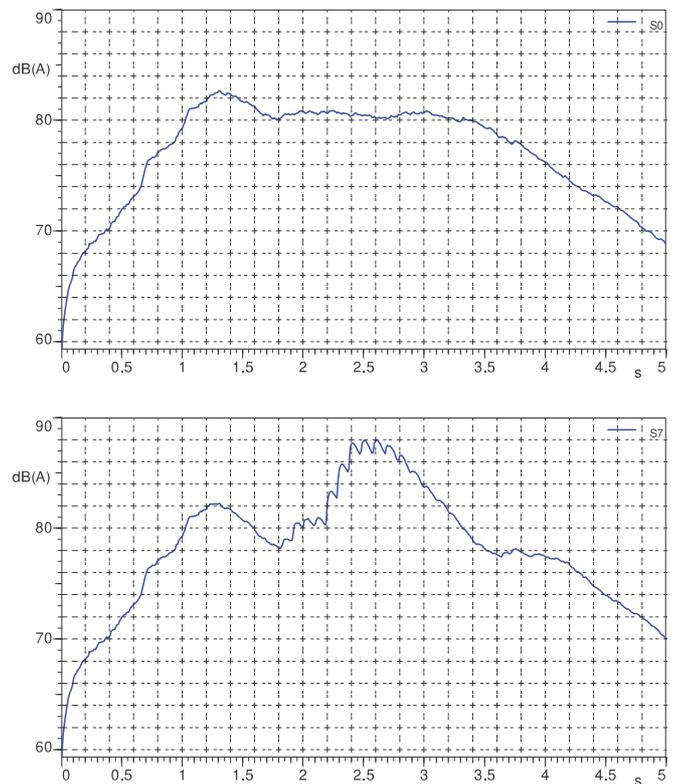
Zur Klärung der beiden Fragestellungen wurden unter anderem die folgenden zwei Hörversuchsreihen durchgeführt:

### Versuchskonzept Lästigkeitszuschlag

Zur subjektiven Bewertung der Lästigkeit eines Flachstellengeräusches in Form eines Pegelzuschlags wurde die Methode des pendelnden Einregelns verwendet. Dazu wurde eine möglichst unauffällige und gleichförmige Zugvorbeifahrt als Referenzvorbeifahrt ohne Flachstelle ausgewählt.

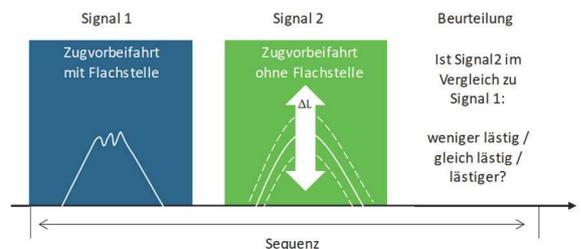
Aus dem Datenpool der Zugvorbeifahrten mit erkannten Flachstellen wurden insgesamt 14 Geräuschabschnitte mit Flachstellengeräuschen elektroakustisch extrahiert und das jeweils entstandene Sample in die Referenzvorbeifahrt eingemischt. Dabei wurde darauf geachtet, dass Referenzvorbeifahrt und Flachstellen-Sample bei vergleichbarer Vorbeifahrtsgeschwindigkeit aufgenommen wurden.

Dadurch entstanden jeweils Schallpaare derselben Zugvorbeifahrt ohne und mit Flachstellen-Sample. Beide Signale des Schallpaares werden zunächst bei gleicher Aussteuerung dargeboten, so dass sich diese ausschließlich durch die eingemischte Flachstelle unterscheiden.



**Abbildung 3:** Referenzvorbeifahrt im Original ohne Flachstelle (oben) und mit eingemischtem Flachstellen-Sample (unten)

Im Hörversuch wurde den Versuchspersonen das Schallpaar in unmittelbarer Aufeinanderfolge als Sequenz dargeboten. Die Aufgabe bestand darin, anschließend zu bewerten, ob das zweite Signal ohne Flachstelle (die Referenzvorbeifahrt) weniger lästig, gleich lästig oder lästiger als das erste Signal mit Flachstelle empfunden wird.



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung einer Sequenz für den Hörversuch mit der Methode des pendelnden Einregelns. Je nach Antwort wird in der nächsten Sequenz der Pegel von Signal 2 angepasst.

Abhängig von der Bewertung durch die Versuchsperson wird der Pegel des zweiten Signals bei der erneuten Darbietung derselben Sequenz angehoben oder abgesenkt. Der Betrag der Anhebung bzw. Absenkung wird dabei mit jeder Wiederholung reduziert, so dass sich der Pegel des zweiten Signals bei empfundener gleicher Lästigkeit im Vergleich zum ersten Signal mit Flachstelle „einpendelt“.

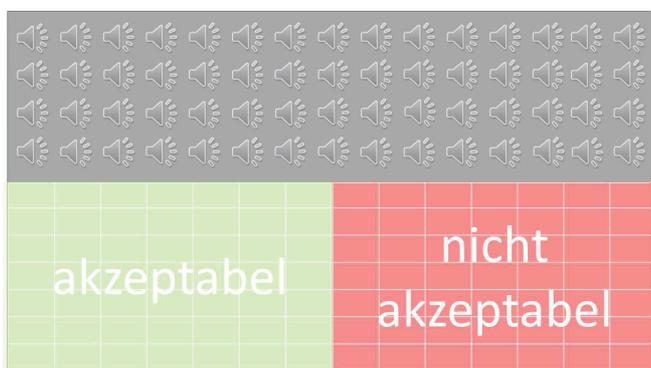
**Tabelle 1:** Beispielhafter Antwortverlauf der Versuchsperson mit zugehöriger Pegelanpassung

Sequenz	Antwort der Versuchsperson	Anpassung von Signal 2
Darbietung 1	Signal 2 ist weniger lästig als Signal 1	+ 2 dB
Darbietung 2	Signal 2 ist lästiger als Signal 1	- 1 dB
Darbietung 3	Signal 2 ist weniger lästig als Signal 1	+ 0,5 dB
Darbietung 4	Signal 2 ist lästiger als Signal 1	- 0,5 dB
Darbietung 5	Signal 2 ist gleich lästig wie Signal 1	Ergebnis: $\Delta L = 1$ dB

**Versuchskonzept Akzeptanzschwelle**

Zur Beantwortung der zweiten Fragestellung, ab wann ein Flachstellengeräusch als subjektiv nicht mehr akzeptabel bewertet wird, wurde folgendes Versuchskonzept verwendet:

Den Versuchspersonen wurden insgesamt 60 unveränderte Aufnahmen von Zugvorbeifahrten zur Beurteilung angeboten. Dabei handelte es sich um 60 Vorbeifahrten, die eine akustisch auffällige Flachstelle enthielt. Messposition und Vorbeifahrtsgeschwindigkeit entsprechen somit den Anforderungen der TSI Noise [5]. Es wurden Zugvorbeifahrten ausgewählt, die keine anderweitigen Auffälligkeiten enthielten und es wurde zudem auf eine Auswahl von Flachstellen mit unterschiedlicher Ausprägung geachtet. Für die Bewertung der Akzeptanz eine Flachstelle wurde der flachstellenbehaftete Ausschnitt der Zugvorbeifahrt dargeboten.



**Abbildung 5:** Versuchsdesign zur Ermittlung der Akzeptanzschwelle

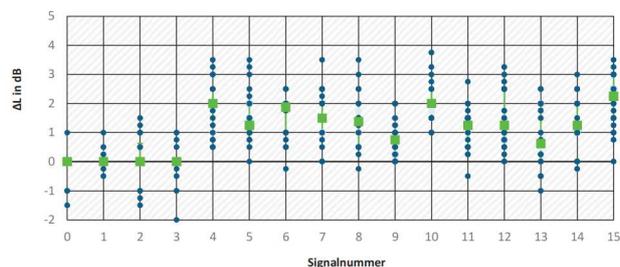
Die Versuchspersonen konnten in der in Abbildung 6 dargestellten Bildschirmdarstellung des Versuchs aus den 60 Samples die Geräusche in beliebiger Reihenfolge und beliebig oft durch Anklicken anhören. Die Aufgabe bestand darin, die Symbole für die 60 Vorbeifahrten je nach subjektiver Bewertung in die beiden Felder „akzeptabel“ oder „nicht akzeptabel“ anzuordnen.

**Ergebnisse**

**Lästigkeitszuschlag**

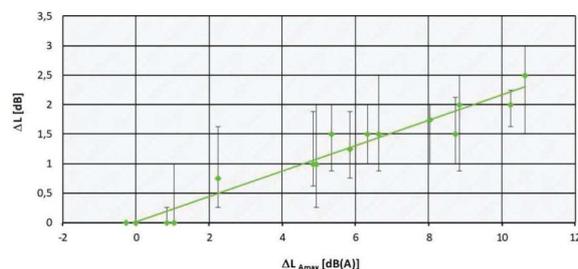
Die aus dem pendelnden Einregeln resultierenden Pegeldifferenzen  $\Delta L$  geben die erforderliche Anhebung (+) bzw. Absenkung (-) der Referenzvorbeifahrt gegenüber der

Vorbeifahrt mit Flachstelle an, um gleiche Lästigkeit zu erzielen. Für die 16 Schallpaare der Versuchsreihe sind die Mediane je Versuchsperson und der Median über alle Versuchspersonen in folgender Abbildung dargestellt:



**Abbildung 6:** Ergebnisse für den Lästigkeitszuschlag; Grün: Ergebnisse der Hörversuche im Mittel (Median und Interquartile), dunkelblau: Ergebnisse der einzelnen Versuchspersonen

Es resultierten somit je nach Flachstelle Pegeldifferenzen im Mittel bis zu 2,5 dB. Um zu überprüfen, ob die Versuchspersonen zuverlässige Ergebnisse produzieren, wurde im Versuch zusätzlich eine identische Vorbeifahrt jeweils ohne Flachstelle als Signal 1 und 2 dargeboten. Dieser Vergleich entspricht „Signal 0“, bei welchem korrekter Weise eine Pegeldifferenz von 0 dB von den Versuchspersonen eingeregelt wurde. Wird nun der eingeregelt Pegelunterschied dem Unterschied der Vorbeifahrt ohne und mit Flachstelle im A-bewerteten Maximalpegel gegenübergestellt, so resultiert der im Folgenden dargestellte Zusammenhang.



**Abbildung 7:** Notwendige Pegelanhebung der Vorbeifahrt ohne Flachstelle für eine gleiche Lästigkeit wie die Vorbeifahrt mit Flachstelle, aufgetragen über dem Unterschied im A-bewerteten Maximalpegel  $L_{Amax}$  der Vorbeifahrten mit und ohne Flachstelle

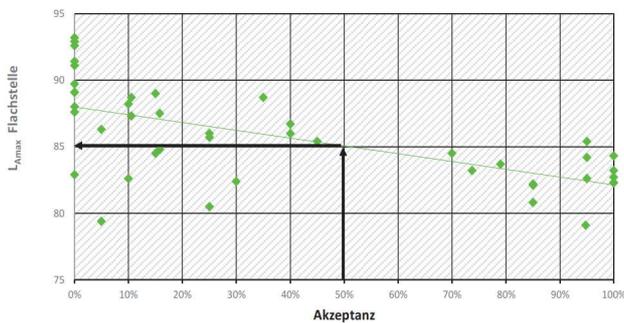
Um einen Pegelunterschied im Maximalpegel von etwa 10 dB, verursacht durch die Flachstelle, in der wahrgenommenen Lästigkeit auszugleichen, ist somit eine Anhebung des Gesamtsignals ohne Flachstelle um 2,5 dB nötig. Ein Lästigkeitszuschlag in dB könnte sich somit an der durch die Flachstelle verursachten Anhebung im Maximalpegel orientieren und mit dem Zusammenhang abgeschätzt werden:

$$Pegelzuschlag [dB] = 0,25 \cdot \Delta L_{Amax} [dB] \quad (1)$$

**Akzeptanzschwelle**

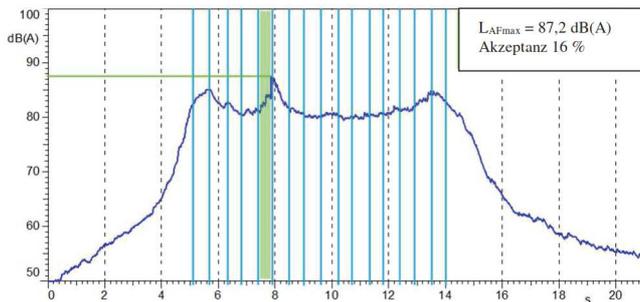
In folgender Abbildung ist der Zusammenhang zwischen dem Maximalpegel der jeweils dargebotenen Flachstelle und der

jeweiligen Akzeptanz durch die Versuchspersonen dargestellt. Dabei kennzeichnet 100 % Akzeptanz, dass die Flachstelle von allen Versuchspersonen als akzeptabel eingestuft wird und 0 % Akzeptanz, dass die Flachstelle von allen Versuchspersonen als inakzeptabel eingestuft wird.



**Abbildung 8:** A-bewerteter Maximalpegel der Flachstelle über der von den Versuchspersonen beurteilten Akzeptanz

Wird eine Akzeptanzschwelle von 50 % zugrunde gelegt (d.h. dass 50 % der Personen die Vorbeifahrt des Zuges mit der akustisch auffälligen Flachstelle als akzeptabel einstufen), liegt für die hier betrachteten Flachstellensignale die Grenze für einen zulässigen A-bewerteten Maximalpegel ausgelöst durch die Flachstelle demnach bei 85 dB(A). Dieser Wert liegt somit um 2 dB(A) über dem nach TSI Noise zulässigen Grenzwert für das Vorbeifahrtgeräusch von Güterwagen von 83 dB(A).



**Abbildung 9:** Zugvorbeifahrt mit Flachstelle nach etwa 8 Sekunden; entsprechend Abbildung 8 resultiert für diese Flachstelle eine Akzeptanz von 16 %

## Fazit

Es kann somit zusammenfassend festgehalten werden, dass eine Zugvorbeifahrt mit Flachstelle eine vergleichbare Lästigkeit aufweist, wie eine Zugvorbeifahrt ohne Flachstelle, deren Pegel um 25 % der durch die Flachstelle verursachten Anhebung im Maximalpegel erhöht ist.

Ab einem durch eine Flachstelle verursachten  $L_{AFmax}$ , der 2 dB(A) über dem nach TSI Noise zulässigen Vorbeifahrtgeräusch des ungestörten Wagens liegt, wird die Flachstelle von weniger als 50 % der Versuchspersonen als akzeptabel eingestuft.

## Literatur

[1] BMVI, 2020. Die Schiene wird leiser! Ziel des BMVI bis 2030: Um die Hälfte weniger Lärmbetroffene! [online]. 14. Dezember 2020 [letzter Zugriff am: 10. August

2021]. Nicht mehr verfügbar : <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/virtuell-e-pk-leise-schiene.html>

- [2] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV) Anlage 2 (zu § 4); Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03)
- [3] EISENBAHN-BUNDESAMT, 2022. Lärm-Monitoring . Schallmessungen im Schienenverkehr [online]. [Zugriff am: 31. März 2022]. Verfügbar unter: <https://www.laerm-monitoring.de/>
- [4] [MÜLLER-BBM RAIL TECHNOLOGIES GMBH, 2021a. Wheel Monitoring System (WMS) [online]. 17. Februar 2021 [Zugriff am: 17. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.muellerbbm-rail.de/produkte/wheel-monitoring-system/>
- [5] EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2014. Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 der Kommission vom 26. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lärm“ sowie zur Änderung der Entscheidung 2008/232/EG und Aufhebung des Beschlusses 2011/229/EU [online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32014R1304>
- [6] Huth, Ch., Forstreuter M., Liepert, M., Arlt, R.: Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens des Umweltbundesamts FKZ 3718 54 102-0, Veröffentlichung 2022.