Die Lästigkeit einer Flachstelle in Abhängigkeit von psychoakustischen Empfindungsgrößen

Melissa Forstreuter[1], Dr. Christine Huth[1], Manfred Liepert[1]

[1] *Möhler + Partner Ingenieure AG, 86153 Augsburg, E-Mail: info@mopa.de*

Hintergrund

Das Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur hat zusammen mit der Deutschen Bahn AG beschlossen, bis 2030 die Zahl der vom Lärm Betroffenen zu halbieren. Eine der Maßnahmen hierbei ist das Umrüsten auf sogenannte „Flüsterbremsen“. Aufgrund der dadurch leiseren Güterzüge treten andere Störgeräusche deutlicher in den Vordergrund, so beispielsweise auch das teilweise als lästig empfundene Geräusch von abgeflachten Stellen am Rad, den Flachstellen. Aufgrund dessen führt Möhler und Partner seit 2018 ein vom Umweltbundesamt (UBA) fachlich begleitetes sowie vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) im Rahmen des Ressortfoschungsplans finanziertes Forschungsprojekt (FKZ 3713 54 1020) durch, welches verschiedene Aspekte zum Thema Flachstellen betrachtet. Hierbei wurde unter anderem ein hörgerechtes Detektionsverfahren für Flachstellen erarbeitet. In Hörversuchen wurde die Lästigkeit von Zugvorbeifahrten mit Flachstellen beurteilt und mit verschiedenen akustischen Größen und psychoakustischen Empfindungsgrößen korreliert. Die leitende Fragestellung für diesen Ansatz lautete: Von welchen Größen hängt die Lästigkeit einer vorbeifahrt mit Flachstelle ab? Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

Datensatz

Die Datenbasis für die Hörversuche lieferte eine Messreihe an einer viel befahrenen Bahnstrecke. Zur Verfügung standen Audiodateien im WAV-Format welche in 7,5 m und 25 m Entfernung zum Gleis aufgezeichnet wurden. Zudem wurde mit dem Wheel-Monitoring-System von Müller BBM [1] neben akustischen und zugspezifischen Parametern achsgenau der sogenannten „Flachstellenindikator“ ermittelt. Zur Verfügung stand damit ein Gesamtdatensatz von 1825 Vorbeifahrten von Personenzügen sowie 1130 Vorbeifahrten von Güterzügen. Eine Abbildung des Messaufbaus am Gleis ist in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1: Darstellung des Messaufbaus

Signalauswahl und -bearbeitung

Für die Hörversuche wurden 15 Signale an der Messposition 7,5 m mit subjektiv unterschiedlich stark ausgeprägten Flachstellen ausgewählt um für die Hörversuche Signale zu erhalten, die sich nur hinsichtlich der Flachstellenausprägung, jedoch nicht hinsichtlich anderer zugspezifischer Parameter unterscheiden, wurden die Signale zunächst digital bearbeitet. Hierfür wurde in das „Standardsignal“ einer Zugvorbeifahrt ohne Flachstelle jeweils der flachstellenbehaftete Ausschnitt der 15 Signale eingemischt. Die Dauer der so resultierenden Signale betrug 5 Sekunden. Abbildung 2 zeigt schematisch diese Bearbeitung der Signale zur Vorbereitung des Hörversuchs.

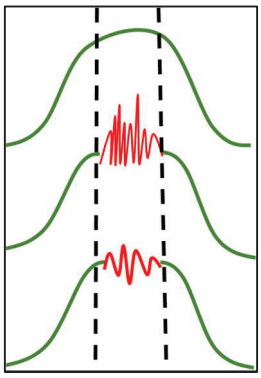


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Signalbearbeitung; grünes Signal: Standardsignal; rot: Signalanteil unterschiedlicher Flachstellen

Signalanalyse

Nach der Bearbeitung der Signale wurden diese hinsichtlich unterschiedlicher akustischer und psychoakustischer Größen ausgewertet. Zunächst wurde der Zeitverlauf des A-bewerteten Schalldruckpegels, der psychoakustischen Schärfe, Lautheit und Schwankungsstärke ausgewertet, um dann die Maximalwerte der jeweiligen Analysegrößen auszulesen. Eine beispielhafte Auswertung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

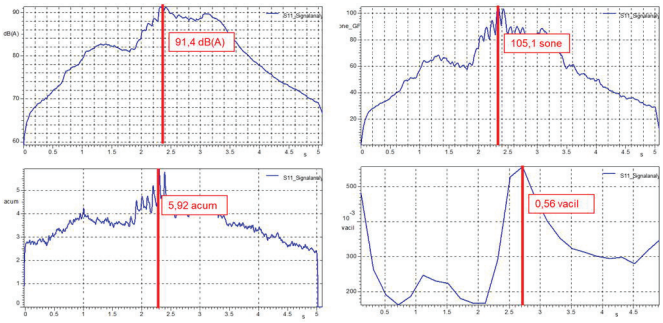


Abbildung 3: Beispielhafte Signalanalyse eines Flachstellensignals. Dargestellt jeweils über der Zeit: oben links der A-bewertete Pegel, oben rechts die Lautheit, unten links die Schärfe und unten rechts die Schwankungsstärke.

Hörversuch

Als psychometrische Methode für den Hörversuch wurde das Random Access Verfahren [2] verwendet. Hierfür wurden die 15 bearbeiteten Signale den Versuchspersonen randomisiert als Schallsymbole dargestellt. Diese konnten beliebig oft angehört werden und waren dann per „Drag and Drop“ nach aufsteigenden Lästigkeit anzuordnen. Das Layout des Versuchs ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 4: Hörversuchsoberfläche nach dem Random Access Verfahren.

Die Darbietung erfolgte je Versuchsperson in einer einzelnen Sitzung über Kopfhörer. Am Versuch nahmen insgesamt 20 Probanden und Probandinnen (15m/5w) im Alter zwischen 22 und 50 Jahren teil. Die Versuchsperson wurde nach ausführlicher Einweisung mit der alleinigen Durchführung des Hörversuchs betraut. Die folgende Abbildung zeigt das Equipment in der Hörkabine.

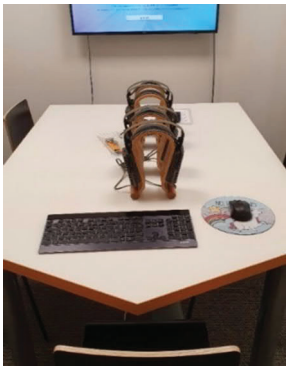


Abbildung 5: Hörkabine zur Durchführung des Hörversuchs

Auswertung

Als Ergebnis der Hörversuche resultiert somit zunächst für jede Versuchsperson eine Rangordnung hinsichtlich der Lästigkeit der 15 Signale. Abbildung 6 zeigt den über alle Versuchspersonen gemittelten Wert (Median) für jedes der Signale.

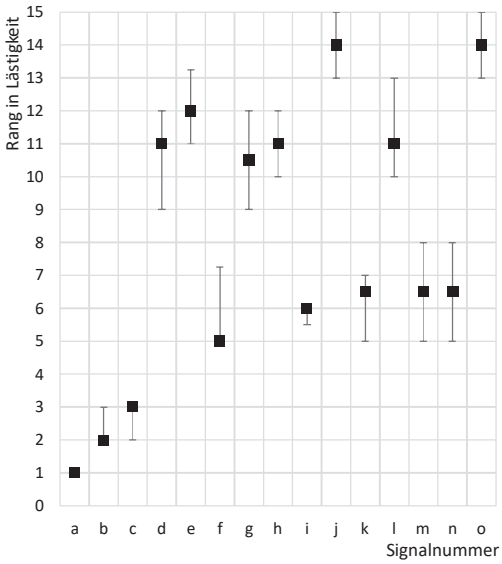
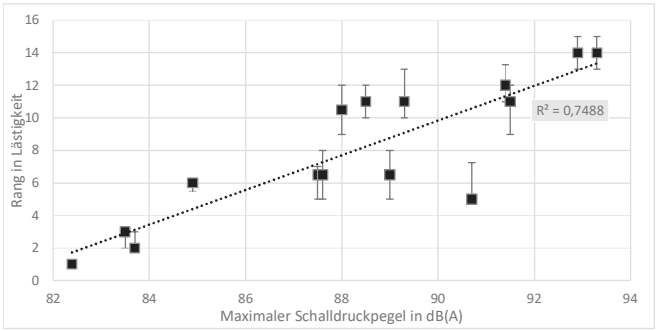
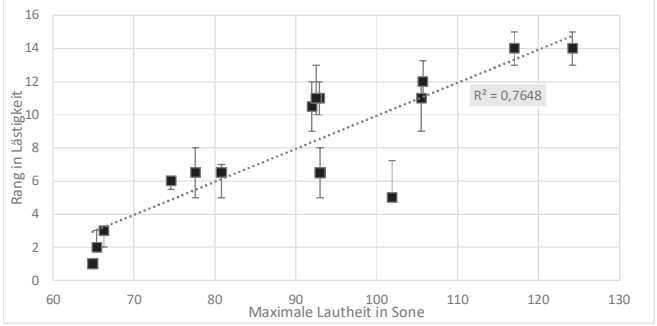


Abbildung 6: Rang in Lästigkeit (Median und Interquartile) gemittelt über alle Versuchspersonen für jedes der 15 bewerteten Signale a bis o.

Nachfolgend werden diese Ergebnisse jeweils über den Maximalwerten der akustischen und psychoakustischen Analysegrößen grafisch dargestellt, um so die Korrelation zwischen der Lästigkeit und der jeweiligen Analysegröße zu ermitteln. In Übereinstimmung mit der Literatur [3] resultiert die höchste Korrelation für die psychoakustische Lautheit.





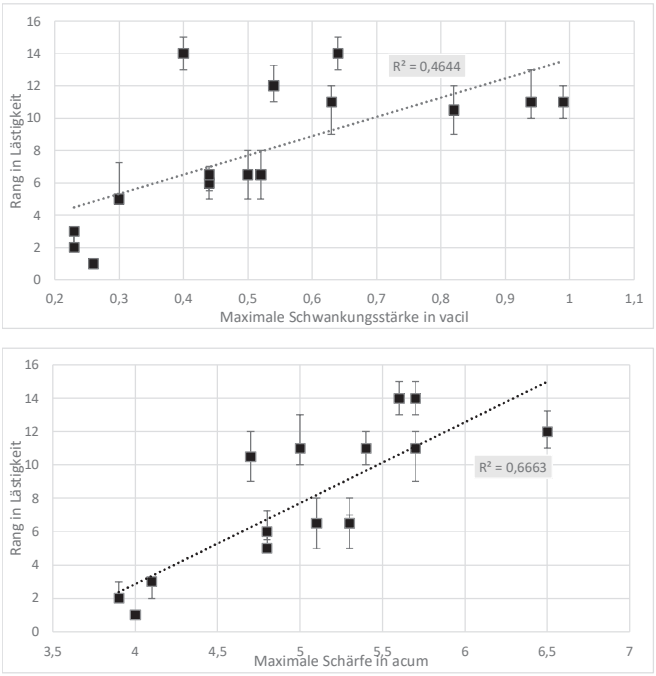


Abbildung 7: Von oben nach unten Rang in Lästigkeit über: dem A-bewerteten maximalen Schalldruckpegel L_{afmax}, der maximalen Lautheit, der maximalen Schwankungsstärke und der maximalen Schärfe. Dargestellt ist zudem eine lineare Regressionsgerade und das zugehörige Bestimmtheitsmaß.

Um zu überprüfen, ob das Einbeziehen weiterer Empfindungsgrößen das Ergebnis verbessern kann, wurde eine Varianzanalyse mittels multipler Regression durchgeführt. Bei einer Varianzaufklärung von 100% kann ein Ergebnis (hier: Rang in Lästigkeit) vollständig durch die Analysegrößen (hier: Empfindungsgrößen) erklärt werden. Anhand der Regression resultierte eine aufgeklärte Varianz zwischen dem Rang in Lästigkeit und der Lautheit von 76 %. Mittels multipler Regressionen wurde der zusätzliche Einfluss der Schärfe und Schwankungsstärke auf die aufgeklärte Varianz zwischen dem Rang in Lästigkeit und der Lautheit berechnet. Die Schärfe hat hierbei einen zusätzlichen Einfluss von 4 %, dies entspricht somit einer Varianzaufklärung von 80 % bei kombinierter Betrachtung von Schärfe und Lautheit. Die Schwankungsstärke hat einen zusätzlichen Einfluss von 13 %, was einer Varianzaufklärung von 89 % bei kombinierter Betrachtung von Lautheit und Schwankungsstärke entspricht. Bei der Betrachtung aller 3 Empfindungsgrößen (Lautheit, Schärfe, Schwankungsstärke) findet sich eine Varianzaufklärung von 91 %. Die resultierenden Werte sind in Tabelle 1 zur besseren Übersicht tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 1: Regressionsanalyse

	Lautheit	Lautheit + Schärfe	Lautheit + Schwankungsstärke	Lautheit + Schärfe + Schwankungsstärke
Varianzaufkläung des Rang in Lästigkeit	76%	80%	89%	91%
Zusätzliche Varianzaufklärung		+ 4%	+ 13%	+ 15%

Fazit

Mittels Hörversuchen wurde in der vorliegenden Arbeit die Lästigkeit von Zugvorbeifahrten mit Flachstellen untersucht. Die Maximalwerte unterschiedlicher Messgrößen bei Flachstellenvorbeifahrt wurden als Basis für eine Regressionsanalyse für die Flachstellenlästigkeit herangezogen.

Es resultierte eine hohe Korrelation zwischen der im Hörversuch beurteilten Lästigkeit einer Flachstelle mit der berechneten maximalen Lautheit der Flachstelle, aber auch mit dem A-bewerteten Maximalpegel der Flachstelle. Wird zur Beschreibung der Lästigkeit einer Flachstelle sowohl die Lautheit als auch die Schwankungsstärke herangezogen, resultiert eine Varianzaufklärung von 89 %.

Insgesamt scheinen diese Messgrößen somit ein geeignetes Werkzeug darzustellen, um die Lästigkeit einer Flachstelle gehörgerecht beschreiben zu können. Im weiteren Verlauf wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens zusätzlich das Beschleunigungssignal an der Schiene bei Zugüberfahrt mit in die Analysen einbezogen. Auch wurde zur Überprüfung der Zusammenhänge die Datenbasis erweitert. Details hierzu können im Schlussbericht [4] des Forschungsvorhabens eingesehen werden.

Literatur

[1] Müller-BBM Rail Technologies GmbH: Wheel Monitoring System (WMS), 2021. https://www.muellerbbm-rail.de/produkte/wheel-monitoring-system/

[2] Fastl, H.: Psychoacoustics and Sound Quality. In: Fortschritte der Akustik. DAGA, Dt. Gesellschaft für Akustik e.V. (2002), S. 765–766

[3] Widmann, U.: Ein Modell der Psychoakustischen Lästigkeit von Schallen. Dissertation. TU München 1992

[4] Huth, C., Forstreuter, M., Liepert, M. u. Arlt, R.: Abschlussbericht des Forschungsvorhaben "Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums" in Vorbereitung