

TEXTE

60/2022

Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums

Kurzfassung

TEXTE 60/2022

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3718 54 102 0

FB000726

Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums

Kurzfassung

von

Dr.-Ing. Christine Huth, Melissa Forstreuter,
Manfred Liepert, Robert Arlt
Möhler + Partner Ingenieure AG

mit Unterauftragnehmer

Prof. Dr. Dominik Kupfer, Sebastian Hild, Hannes Raff
W2K Rechtsanwälte Partnerschaft mbB

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
mailto:info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Möhler + Partner Ingenieure AG
Prinzstraße 49
86153 Augsburg

Abschlussdatum:

November 2021

Fachliche Betreuung:

Fachgebiet I 2.3 Lärminderung im Verkehr
Percy Appel

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2022

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Messung von Flachstellen und Ermittlung eines akustischen Instandhaltungskriteriums

Zugvorbeifahrten mit abgeflachten Stellen am Rad, den sogenannten Flachstellen, können für Anwohnende eine deutliche Lärmbelastung bedeuten. Deshalb beleuchtet das vorliegende Forschungsvorhaben Möglichkeiten eine Instandhaltung von Rädern über ein „akustisches Kriterium“ festzulegen.

Hierfür wurde ein Vorschlag für eine gehörgerechte Detektion von Flachstellen entwickelt, der basierend auf dem Maximalpegel und der Schienenbeschleunigung bei einem vorbeifahrenden Wagen Flachstellen erkennt. Zur Bewertung der Flachstelle, wird in einem zweiten Schritt ein Grenzwert vorgeschlagen. Im Rahmen einer juristischen Bewertung wurden Möglichkeiten der Implementierung des „akustischen Flachstellenkriteriums“ in die Rechtsordnung vorgestellt. Auch Möglichkeiten einer betrieblichen Umsetzbarkeit wurden diskutiert.

Um die durch Flachstellen verursachten Instandhaltungskosten zu erfassen, wurde eine Befragung von Akteuren im Bereich Schienengüterverkehr, Schienenpersonenverkehr und Eisenbahninfrastruktur durchgeführt. Während für das Rollmaterial eine Abschätzung hinsichtlich der flachstellenbezogenen Instandhaltungskosten möglich war, zeigte sich, dass im Bereich der Infrastruktur die durch Flachstellen verursachten Kosten aktuell nicht erfasst werden. Auf Basis dieser Befragungsergebnisse wurden mögliche Motivationsstrategien zur Verminderung der Anzahl von Flachstellen im deutschen Schienennetz diskutiert.

Abstract: Measurement of wheel flats and investigation of an acoustic maintenance criterion

Trains passing with wheel flats mean a significant noise exposure for residents. Therefore, the present research project sheds light on the possibility of defining the maintenance of wheels by an “acoustical criterion for flat spots”.

For this purpose, a detection of wheel flats was developed in a manner that corresponds to our hearing sensation and is based on the maximum level and the rail acceleration during the train passing with a flat spot. In a second step, a limit value was proposed to evaluate the flat spot.

In the context of a legal evaluation options for implementing this “acoustic criterion for flat spots” were presented. Opportunities for the operational feasibility were also discussed.

In order to determine the maintenance costs caused by flat spots, a survey of stakeholders in the field of rail freight transport, rail passenger transport and rail infrastructure was carried out. In the field of freight and passenger transport, an estimation of the maintenance costs caused by flat spots was feasible. However, in the field of infrastructure the maintenance costs caused by flat spots are currently not gathered. Based on the survey results possible motivation strategies were discussed to reduce the number of flat spots on the German railway infrastructure.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
2	Ausformungen von Radformfehlern und Lärmentstehung.....	9
3	Regeln der Technik zur Bewertung von Flachstellen	10
4	Abschätzung der verursachten Lärmbelastung.....	11
5	Messverfahren ohne geometrische Vermessung des Rads zur Detektion von Flachstellen	12
6	Durchführung von Messungen zur Bereitstellung der Datengrundlage	13
7	Evaluierung der Flachstellenakzeptanz	14
8	Spezifikationsvorschlag zur Erfassung von akustisch auffälligen Flachstellen und Möglichkeiten einer Automatisierung	16
9	Kostenermittlung und betriebliche Umsetzbarkeit.....	17
10	Szenario für ein Lärm-Monitoring für akustisch auffällige Flachstellen.....	19
11	Rechtliche Bewertung und Vorschläge für ein Fördersystem.....	20
12	Vorschlag für ein „Akustisches Instandhaltungskriterium für Flachstellen“ – Umsetzung und Handreichung	21
13	Quellenverzeichnis	23

1 Einleitung

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und die Deutsche Bahn AG haben gemeinsam ein Lärminderungsziel für die nächsten 10 Jahre beschlossen. So soll bis 2030 die Hälfte aller Anwohnenden an Bahnstrecken vom Schienenlärm entlastet werden (BMVI, 2020). Davor wiederum war das Lärmschutzziel 2020 die Halbierung des Schienenlärms. Folgende Instrumente wurden hierbei zur Erreichung dieses Ziels herangezogen:

- ▶ Die Umrüstung auf lärmarme Bremstechnik an Güterwagen
- ▶ Lärmabhängige Trassenpreise
- ▶ Lärmschutz an der Infrastruktur im Rahmen des freiwilligen Programms der Lärmsanierung an Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes

Die technische Umsetzung des ersten Punktes, der Umrüstung auf lärmarme Bremssysteme an Güterwagen, erfolgt durch Austausch der bisher eingesetzten „lauten“ Klotzbremsen mit Grauguss-Bremssohlen durch sogenannte LL-Sohlen (Low Noise, Low-Friction). Neue Güterwagen werden werksseitig bereits mit sog. K-Sohlen (Komposit-Bremssohlen) ausgeliefert. Diese reduzieren bei Fahrzeugen, bei denen die Bremssohlen auf die Radfahrfläche wirken, das Rad-Schiene-Geräusch. Im Gegensatz zu den bisherigen Grauguss-Bremssohlen rauhen die Komposit-Bremssohlen aufgrund ihres elastischen Materials die Fahrfläche der Bremssohlen nicht auf.

Vor allem für Güterwagen, bei denen die Bremsklötze meist auf die Radlaufflächen wirken und dadurch die Summe der Rauheiten an den Kontaktflächen Rad/Schiene höher ist als bei Personenwagen, ist ein großer Effekt zu verzeichnen. Personenwagen werden in Deutschland grundsätzlich scheibengebremst.

Die neu verwendeten Bremssohlen rauhen die Radlaufflächen deutlich weniger auf, so dass das Rollgeräusch weniger Emissionen verursacht. Die Pegelminderung durch die neuen Bremssysteme beträgt nach der Rechenvorschrift Schall 03 in Anlage 2 der 16. BImSchV (16. BImSchV, 1990) 5 dB(A) bei 100 km/h auf einem durchschnittlichen Gleis. In der Realität beträgt die Pegelminderung je nach Zustand der Laufflächen und Fahrgeschwindigkeit auf durchschnittlichem Gleis bis zu 7 dB(A). In Verbindung mit einem glatten Gleis oder dem besonders überwachten Gleis haben sich nach eigenen Messungen noch höhere Pegelminderungen von 8 bis 10 dB(A) ergeben.

Werden in einem Zugverband Bremssysteme mit LL-Sohlen oder K-Sohlen und GG-Sohlen kombiniert, so kann es aufgrund der unterschiedlichen Bremskurven (Abhängigkeit der Geschwindigkeit eines bremsenden Zuges vom Bremsweg) vermehrt zu einem Blockieren einzelner Radsätze kommen. Dies kann zu einem Gleiten der Räder auf dem Gleis führen, sofern kein Antiblockiersystem verwendet wird. Da die Räder aus einer weicheren Legierung als die Schiene bestehen, wird das Material der Räder an der Stelle, an der das Rad über die Schiene gleitet, abgenutzt und es entstehen Flachstellen.

Ein Nebeneffekt der Lärmverringerung durch die Umrüstung ist eine größere akustische Auffälligkeit bei Abweichungen des Radsatzes von der ideal runden Form. So können bei einer Verringerung des Abrollgeräuschs generell andere Geräuschquellen, wie zum Beispiel die überwiegend impulshaltigen Geräuschanteile von Flachstellen, in den Vordergrund treten.

Aktuell erfolgt die Instandhaltung von Flachstellen planmäßig bei Erreichen eines geometrischen Grenzwerts der abgeflachten Stelle oder außerplanmäßig bei vom Triebführer

wahrgenommenen Vibrationen oder Geräuschentwicklungen. Die durch Flachstellen verursachte Geräuschentwicklung wird jedoch für den Instandhaltungsprozess nicht in Betracht gezogen. Ziel des hier vorliegenden Forschungsvorhabens war es, ein akustisches Instandhaltungskriterium für Flachstellen zu ermitteln. Letztendlich sollen damit dann akustisch auffällige Flachstellen vom deutschen Schienennetz verbannt werden. Durch die dadurch möglicherweise frühere Instandhaltung des Rollmaterials – so die Hypothese – könnte zudem die Schieneninfrastruktur und das Rollmaterial geschont und somit Kosten für die Instandhaltung für die betreffenden Schienenverkehrsakteure reduziert werden.

Einführend erfolgte eine Recherche zu der durch Flachstellen verursachten Lärmbelastung (Kapitel 4 des Abschlussberichts) und veröffentlichten Detektionsverfahren für Flachstellen (Kapitel 5 des Abschlussberichts). Eine Messreihe an einer Bahnstrecke (Kapitel 6 des Abschlussberichts) lieferte die Datenbasis für eine ausführliche Untersuchung mit dem Ziel einer gehörgerechten Detektion und Bewertung von Flachstellen (Kapitel 7 des Abschlussberichts). Des Weiteren wurden auf Basis einer Befragung von Akteuren im Bereich Schienengüterverkehr, Schienenpersonenverkehr und Eisenbahninfrastruktur die durch Flachstellen verursachten Instandhaltungskosten ermittelt. Auf Basis der Befragungsergebnisse wurde die potentielle Kostenersparnis bei einer früheren Behebung der Flachstellen abgeschätzt (Kapitel 9 des Abschlussberichts). In einem letzten Aspekt wurde die Berücksichtigung des akustischen Flachstellenkriteriums im rechtlichen Rahmen bewertet (Kapitel 10 des Abschlussberichts). Abschließend wird der resultierende Vorschlag für ein „**akustisches Instandhaltungskriterium von Flachstellen**“ als Handreichung für den Leser zusammengefasst (Kapitel 11 des Abschlussberichts).

2 Ausformungen von Radformfehlern und Lärmentstehung

Zu Radformfehlern zählen neben Flachstellen beispielsweise Materialauftragungen, Ausbröckelungen, Abblätterungen, Exzentrizitäten, Ovalitäten oder Polygonisierungen.

Diese können grundsätzlich in

- ▶ singuläre Fehler, die eine Abweichung vom Rundlauf ohne regelmäßige Wiederholung innerhalb einer Radabwicklung darstellen, und
- ▶ periodische Fehler, die im Gegensatz dazu eine periodische Abweichung darstellen,

kategorisiert werden. Flachstellen fallen hierbei unter die singulären Fehler.

Flachstellen entstehen durch das Gleiten des Rades auf der Schiene. Beim Gleitvorgang des Rads auf der Schiene wird Material vom Rad abgetragen, da das Rad aus einer weicheren Legierung besteht als die Schiene. Am Rand der Flachstelle befindet sich kurz nach Entstehung ein Grat, der bei weiterem Betrieb abgeflacht wird.

Wenn bei den im Eisenbahnbereich üblichen starren Achsen ein Radsatz blockiert, treten damit normalerweise beidseitig gleichermaßen Flachstellen auf.

Beim Abrollen des Rads mit einer Flachstelle kommt es zu einem impulshaltigen Schlagen der flachen Lauffläche auf den Schienenkopf. Dieses periodische Klopfen charakterisiert das typische Geräusch eines vorbeifahrenden Wagens mit Flachstelle.

Auch die Schadfälle Materialauftragung, Ausbröckelung, Abblätterungen oder Eindrückungen der Lauffläche zählen zu den singulären Fehlern und können ähnliche Geräuschentwicklungen wie Flachstellen hervorrufen und sind akustisch oft kaum voneinander trennbar.

Bei der Erarbeitung der vorliegenden Forschungsarbeit hat sich herausgestellt, dass eine akustische Trennung zwischen Laufflächenfehlern und Flachstellen nur schwer möglich ist. Aus diesem Grunde wurde die Forschungsaufgabe nach Rücksprache mit den Forschungsgeber erweitert und umfasst neben den Flachstellen alle anderen singulären Radformfehler bzw. Laufflächenfehler. In diesem Bericht wurde der Einfachheit halber die Begrifflichkeit „Flachstelle“ für alle Laufflächenfehler genutzt.

Exzentrizitäten, Ovalitäten oder Polygonisierungen gehören zu den periodischen Fehlern und zeichnen sich durch Abweichungen der Radlauffläche von der idealen Kreisform aus. In der Veröffentlichung von Maly et al. (Maly, Jaksch und Dinhobl, 2016) kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass beispielsweise Polygonisierungen nahezu in keinem Fall eine akustisch wahrnehmbare Auffälligkeit erzeugen.

Details hierzu finden sich in Kapitel 2 (ab Seite 31) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

3 Regeln der Technik zur Bewertung von Flachstellen

Zur Bewertung von Rädern hinsichtlich Flachstelle im engeren Sinne stehen im Schienengüterverkehr vornehmlich die Inhalte des

- ▶ Allgemeinen Vertrags für die Verwendung von Güterwagen (AVV) im Mittelpunkt.

Des Weiteren steht als normative Regelung die

- ▶ DIN EN 15313:2016-09 Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Radsatzinstandhaltung

zur Verfügung.

Beide Dokumente kategorisieren Flachstellen im engeren Sinne bezüglich geometrischer Abweichungen vom Rad. So werden entsprechend des AVV (Anhang 1) Flachstellen mit einer Länge von mehr als 60mm (bei Raddurchmessern über 840 mm) als Hauptfehler mit der notwendigen Maßnahme „Aussetzen“ bewertet.

Übereinstimmend hierzu findet sich in der DIN EN 15313 (Tabelle 7) für Raddurchmesser von 840 mm eine Längengrenzwert für Flachstellen von 60 mm.

Details hierzu finden sich in Kapitel 3 (ab Seite 39) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

4 Abschätzung der verursachten Lärmbelastung

Als Grundlage für Untersuchungen zu akustischen Auswirkungen von Flachstellen wurden drei Datenquellen herangezogen:

- ▶ Die Veröffentlichung „Schallemissionen von Laufflächenschäden“ von Maly, Dinobl und Jaksch,
- ▶ Das Kapitel „Impact noise due to wheel flats“ (Schlaggeräusche verursacht durch Flachstellen) im Buch „Railway, Noise and Vibration“ von David Thompson und
- ▶ Das Gutachten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenlärm in der Nacht von der Möhler + Partner Ingenieure AG, DLR und ZEUS GmbH.

In der ersten Studie wurden für 3.787 Züge Zusammenhänge zwischen dem Vorbeifahrtgeräusch, geometrischen Parametern von Radformfehlern, wie der Länge einer Flachstelle im engeren Sinne oder der Rundlaufabweichung des Rads, und der Schienenbeschleunigung überprüft. Hierbei erwiesen sich zum einen der Spitzenwert des A-bewerteten Schalldruckpegels, gemessen mit einer Zeitkonstante von 10 ms, und der Modulationsgrad des 2kHz-Oktavbands als geeignete Indikatoren für die akustische Auswirkung von Laufflächenschäden.

In der zweiten Veröffentlichung wird das Vorhandensein einer Flachstelle im engeren Sinne durch eine nichtlineare Anregung in einem linearen, spektralen Modell für den Rad-Schiene-Kontakt abgebildet. Damit wird der Schalleistungspegel für verschiedene Situationen, wie etwa unterschiedliche Achslasten, Fahrgeschwindigkeiten, Flachstellenlängen simuliert. Es resultiert ein Einfluss auf die Schalleistung u.a. durch das Abrunden der Kanten einer Flachstelle, durch die Tiefe der Flachstelle und ebenfalls durch die Radlast. Diese Einflüsse wiederum sind auch geschwindigkeitsabhängig.

In der Studie zum Maximalpegelkriterium wird die Schalleistung einer Zugvorbeifahrt als Linienquelle mit unterschiedlichen Positionen der Quelle entlang der Strecke modelliert. Flachstellen werden hierbei als mitrollende Punktschallquellen modelliert und erzeugen somit am Berechnungspunkt einzelne Spitzen, die durch einen abstandabhängigen Zuschlag auf den berechneten Maximalpegel berücksichtigt werden. Des Weiteren wurde für die Vorbeifahrten von 5.000 Güterzügen die Differenz zwischen dem Maximalpegel und dem Vorbeifahrtsexpositionspegel in verschiedenen Abständen zur Gleismitte berechnet. Wenngleich auf Basis dieser Auswertung nicht auf die Ursache der Maximalpegelanhebung geschlossen werden kann, resultiert hiermit eine wichtige Information zur Abstandabhängigkeit dieser Differenz aufgrund der unterschiedlichen entfernungsabhängigen Pegelabnahme von Linien- und Punktschallquellen.

Details hierzu finden sich in Kapitel 4 (ab Seite 43) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

5 Messverfahren ohne geometrische Vermessung des Rads zur Detektion von Flachstellen

In diesem Abschnitt wurden zunächst grundlegende Verfahren betrachtet, die sich in wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit der Detektion von Flachstellen im engeren Sinne befassen. Hierbei wurden folgende verschiedene Ansätze recherchiert:

- ▶ Flachstellendetektion **mittels hochfrequentem Messsignal** (nach der Veröffentlichung von Arnoczky, P.M.: „Flachstellenortung Quo Vadis“ von 1994)
- ▶ Flachstellendetektion **mittels Körperschallmessung** (nach der Veröffentlichung von Vanderhouten, R., Deutzer, M.: „Detektion von Flachstellen an Radreifen auf der Basis von Schallmessungen am Schienenkörper“ von 2005)
- ▶ Flachstellendetektion **mittels Ultraschalloberflächenwellen und dem Dopplereffekt** (nach der Veröffentlichung von Brizuela, J., Ibanez, A., Nevado, P., Fritsch, C.: “Railway Wheels Flat Detector Using Doppler Effect” von 2009)
- ▶ Flachstellenerkennung **mit Telematik** (nach dem Forschungsprojekt des Schweizer Bundesamt für Umwelt BAFU von 2018)
- ▶ Flachstellenerkennung **mittels Künstlicher Intelligenz** (nach der Veröffentlichung von Dernbach G., Lykartsis A., Sievers L., Weinzierl S.: „Acoustic Identification of Flat Spots On Wheels Using Different Machine Learning Techniques“ von 2020)

Im Weiteren wurden auch kommerziell angebotene Systeme unterschiedlicher Hersteller, die eine Flachstellendetektion anbieten, beschrieben. Hierbei wurden die Systeme

- ▶ acramos® (ACoustic Railway Monitoring System) von psiacoustic in Kombination mit Argos® von HBK
- ▶ Lasca (Lasergestützte Radkraftdiagnose) und Moni (Monitoringsystem) von INNotec Systems GmbH und
- ▶ Wheel Monitoring System WMS von Müller-BBM Rail Technologies

vorgelegt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die meisten Systeme eine Detektion über eine Messstelle an der Infrastruktur durchführen, lediglich eines der vorgestellten Systeme detektiert über eine Messung am Fahrzeug.

Details hierzu finden sich in Kapitel 5 (ab Seite 49) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

6 Durchführung von Messungen zur Bereitstellung der Datengrundlage

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden von Müller-BBM Rail Technologies Messungen mit dem WMS (Wheel Monitoring System) durchgeführt. Zusätzlich wurde am Gleis die Schienenbeschleunigung aufgezeichnet. Es erfolgte eine statistische Auswertung der Zusammensetzung der Zugvorbeifahrten hinsichtlich Güter- und Personenverkehr bzw. hinsichtlich der Flachstellendetektion mittels des WMS.

Im Folgenden erfolgt eine Kurzzusammenfassung der Datengrundlage.

Messort:	Strecke 5510 München – Rosenheim zwischen Ostermünchen und Großkarolinenfeld bei km 53,7 auf dem östlichen Gleis
Messsignale:	WMS linke Schiene, WMS rechte Schiene, Mikrofon Abstand 7,5m, Abstand 25m, Beschleunigungssignal an der linken Schiene, an der rechten Schiene
Messzeitraum:	ca. 1 Monat
Zugvorbeifahrten:	ca. 3000,
Güterzüge insgesamt	1130,
Personenzüge insgesamt	1825

Die Detektion basiert auf der Erkennung der Impulsanregung, verursacht durch den Schlag zwischen Schiene und Rad und ist nach Müller-BBM Rail Technologies proportional zur Schwere der Laufflächenschäden. Eine Auswertung der Datenbasis hinsichtlich des Flachstellenindikators von Müller-BBM Rail Technologies ergibt bei **888 der 1130 Güterzügen**, somit also bei **79 %**, und bei **428 der 1825 Personenzügen**, also bei **23 %**, einen Wert von >5. Ob diese detektierten Flachstellen jedoch auch akustisch auffällig sind, soll im weiteren Verlauf überprüft werden.

Details hierzu finden sich in Kapitel 6 (ab Seite 61) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

7 Evaluierung der Flachstellenakzeptanz

Der wesentliche Ansatz dieses Forschungsvorhaben ist es „akustisch auffällige“ Flachstellen zu erkennen und möglich zeitnah Instand zu setzen. Deshalb wird in dem folgenden Kapitel untersucht, inwieweit auftretenden Flachstellen subjektiv als noch akzeptabel betrachtet werden. Dies wird im Weiteren als „Flachstellenakzeptanz“ bezeichnet.

Um die **Akzeptanz von Flachstellen** zu evaluieren, wurden zunächst Analysen der Schalldrucksignale an der Strecke und der Beschleunigungssignale am Gleis durchgeführt. Hierzu kamen klassische akustische Schalldruckpegel- bzw. Beschleunigungspegelgrößen zum Einsatz, aber auch psychoakustische Größen, wie etwa die Lautheit, die Schärfe oder die Schwankungsstärke.

Für die Erarbeitung eines **Detektionsalgorithmus** wurden statistische Analysen zwischen zwei unabhängigen Stichproben mit je 14 Signalen durchgeführt, eine der Stichproben mit wahrnehmbarer Flachstelle, die andere ohne wahrnehmbare Flachstellen. Es resultierten insbesondere signifikante Unterschiede hinsichtlich der Schwankungsstärke, der Lautheit, dem Pegel des 2kHz-Oktavbands, der Schärfe und dem A-bewerteten Pegel.

Basierend auf eine Analyse der Maxima dieser Größen wurde eine logische Verknüpfung zur Detektion einer Flachstelle von folgenden Größen erarbeitet:

- ▶ psychoakustischen Schwankungsstärke
- ▶ A-bewerteter Pegel
- ▶ 2-kHz Oktavpegel
- ▶ Schienenbeschleunigung

Eine Auswertung von 21 Zugvorbeifahrten resultierte mit dieser Verknüpfung in einer Trefferquote (hörbarer Radlaufdefekt korrekt detektiert) von 97 %, hingegen wurden 17 % der Maxima von nicht hörbaren Radlaufschäden fälschlicherweise als Flachstelle detektiert.

Wird als Input für die Detektion lediglich der A-bewertete Pegel und die Schienenbeschleunigung verwendet, reduziert sich die Trefferquote (hörbare Flachstelle korrekt detektiert) für die 21 Signale auf 85 %. Für eine erweiterte Datenbasis resultiert hier eine Trefferquote von 72 %.

Im weiteren Verlauf sollte die von einer Flachstelle ausgehende akustische Belästigung quantifiziert werden. Hierfür wurden **psychoakustische Experimente zur Akzeptanz von Flachstellen und der Lästigkeit von Flachstellen** durchgeführt. Anhand von 60 Signalen mit einem Flachstellenindikator nach Müller-BBM Rail Technologies zwischen 10 und 196 wurden Versuchspersonen nach der Akzeptanz dieser Signale befragt. Es resultierte jedoch für eine große Bandbreite des Flachstellenindikators (von ca. 10 bis 140) ein Prozentsatz von 100 hinsichtlich der Inakzeptanz dieser Flachstellen. Ebenso fand sich für ein und denselben Wert des Flachstellenindikators (ca. 10) eine Bandbreite von 0 % inakzeptabel bis 100 % inakzeptabel. In einem weiteren Hörversuch wurde für 15 Signale die Lästigkeit der Flachstellen direkt von den Versuchspersonen bewertet. Auf diese Weise ist die Darstellung der Lästigkeit der Flachstellen in Abhängigkeit von anderen Analysegrößen möglich und der Zusammenhang anhand eines Bestimmtheitsmaßes quantifizierbar.

Hierbei resultierten folgende Werte für das Bestimmtheitsmaß für den Zusammenhang der Lästigkeit des Laufflächenfehlers mit

- ▶ dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies: 0,21
- ▶ dem maximalen Schalldruckpegel: 0,75
- ▶ der psychoakustischen Lautheit: 0,76
- ▶ der psychoakustischen Schwankungsstärke: 0,46
- ▶ der psychoakustischen Schärfe: 0,67

Mittels einer multiplen Regressionsanalyse wurde im weiteren Verlauf überprüft, welche Kombinationen dieser Größen die Lästigkeit einer Flachstelle am aussagekräftigsten beschreiben können. Hierbei beschreibt der resultierende Prozentsatz, wie gut die jeweiligen Eingangsgrößen die Lästigkeit abbilden können (100% entspricht einer vollständigen Abbildung). Es ist zu erkennen, dass der A-bewertete Schalldruckpegel bereits 75 % der Lästigkeit abbilden kann.

- ▶ A-bewerteter Schalldruckpegel: 75 %
- ▶ A-bewerteter Schalldruckpegel + 2 kHz- Oktavpegel: 81 %
- ▶ A-bewerteter Schalldruckpegel + Schwankungsstärke: 86 %
- ▶ A-bewerteter Schalldruckpegel + 2 kHz- Oktavpegel + Schwankungsstärke: 88 %

Details hierzu finden sich in Kapitel 7 (ab Seite 69) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

8 Spezifikationsvorschlag zur Erfassung von akustisch auffälligen Flachstellen und Möglichkeiten einer Automatisierung

Für die Detektion von Flachstellen gemäß dem im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Verfahren sind Messungen am Gleis notwendig. Im Folgenden wird ein Vorschlag für mögliche Rahmenbedingungen für die Datenerfassung spezifiziert.

Die Messpositionen für die Erfassung des Luftschalls sind gemäß DIN EN ISO 3095 „Messung der Geräuschemissionen von spurgebundenen Fahrzeugen“ in einem Abstand von 7,5 m von der Mittellinie des Gleises in einer Höhe von 1,2 m oberhalb Schienenoberkante anzuordnen. Um Flachstellen beidseitig detektieren zu können, ist auf beiden Seiten des Gleises ein Messpunkt vorzusehen. Zur Flachstellendetektion an einem Gleis, soll jeweils das der Radscheibe zugewandte Mikrofon herangezogen werden. Für eine einheitliche Flachstellendetektion sind die Abstände mittels Abstandgesetz für die Auswertung rechnerisch anzugleichen.

Als Messposition für die Erfassung der Schienenbeschleunigung sind Schwingungsmessungen an der Schiene durchzuführen. Hierfür sind Beschleunigungsaufnehmer an der rechten und linken Schiene anzubringen.

Schalldruck- und Beschleunigungssignale sind zeitsynchron zu erfassen.

Details hierzu finden sich in Kapitel 8 (ab Seite 97) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

9 Kostenermittlung und betriebliche Umsetzbarkeit

Um eine Datengrundlage zur Kostenermittlung und zur betrieblichen Umsetzbarkeit zu erlangen, wurden **Akteursbefragungen** und **Telefoninterviews** durchgeführt. Bei der Akteursbefragung wurden Unternehmen aus dem Bereich des Schienengüterverkehrs, Schienenpersonenverkehrs und der Eisenbahninfrastruktur befragt. Insgesamt nahmen Akteure

- ▶ im Schienengüterverkehr mit einem Marktanteil von ca. 64 %
- ▶ im Schienenpersonenverkehr mit einem Marktanteil von ca. 15 % und
- ▶ im Bereich der Eisenbahninfrastruktur mit einem Marktanteil von über 80 %

an der Befragung teil.

Bei der Auswertung der Befragung ergaben sich im **Bereich der Eisenbahnverkehrsunternehmen** bzw. **Wagenhalter** für die einzelnen Wagen jährliche Instandhaltungskosten aufgrund von Flachstellen

- ▶ für Güterwagen im Schienengüterverkehr von ca. 500 €,
- ▶ für Triebwagen im Schienengüterverkehr von ca. 2.300 € und
- ▶ für Triebwagen im Schienenpersonenverkehr von ca. 1.600 €.

Absolut betrachtet sind somit die Instandhaltungskosten aufgrund von Flachstellen für Triebwagen deutlich höher als für Güterwagen. Relativ betrachtet ist jedoch der Anteil der Instandhaltungskosten aufgrund von Flachstellen im Verhältnis zu den gesamten Betriebskosten für Güterwagen mit 18 % im Vergleich zu nur 2 % bei den Triebwagen am höchsten.

Im **Bereich der Infrastrukturunternehmen** konnten in der Befragung keine Kosten für Instandhaltungen aufgrund von Überfahrten mit Flachstellen ermittelt werden. Als mögliche Folgeschäden an der Infrastruktur wurden Brüche der Schiene oder der Spannklemmen im Bereich der Schienenbefestigung, Gleisrost an den Schienen, an der Schienenbefestigung, an der Schwelle oder Schäden im Bereich Oberbau- Schotter- Schutzschicht genannt. Ein fundierter Zusammenhang zwischen Überfahrten mit Flachstellen und diesen Folgeschäden ist jedoch bisher nicht erarbeitet worden. Weiterführende Untersuchungen hierzu wären zu empfehlen.

Auf Basis von statistischen Auswertungen der Messungen und Flachstellendetektion mit dem Flachstellenindikator von Müller-BBM Rail Technologies (für Werte >5) wurde die Anzahl der Überfahrten mit Wagen mit und ohne Flachstellen analysiert. Werden alle Triebwagen, Güterwagen und Personenwagen betrachtet, fanden sich im Messzeitraum von 1 Monat bei insgesamt 43.300 Wagen 7.789 Wagen mit einem Flachstellenindikator > 5. Dies entspricht einem Prozentsatz von 18,2 % aller vorbeigefahrenen Wagen.

Auf Basis dieser Daten wurde eine Berechnung zu einer möglichen **Kostenänderungen durch eine frühere Behebung von Flachstellen** durchgeführt. Hierzu wurde aus Mangel an Daten zu Instandhaltungskosten in der Infrastruktur der *flachstelleninduzierte Kostenfaktor FLI*

eingeführt. Mit einer systematischen Variation dieses Kostenfaktors wurde der Einfluss dieser Größe auf die Gesamtkostenentwicklung bei schrittweiser Reduzierung der flachstellenbehafteten Wagen im Schienennetz dargestellt. Sofern die durch Flachstellen verursachten Kosten an der Infrastruktur quantifiziert werden können, kann eine frühere Behebung von Flachstellen durchaus zu einer Kostenersparnis in der Gesamtheit führen.

Details hierzu finden sich in Kapitel 9 (ab Seite 100) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

10 Szenario für ein Lärm-Monitoring für akustisch auffällige Flachstellen

Im Folgenden wurde ein Szenario für Monitoring von akustisch auffälligen Flachstellen an der Infrastruktur mit einer möglichen Erweiterung um ein fahrzeugseitiges Monitoring skizziert.

Das in dieser Arbeit vorgeschlagene Messsystem mit Auswertung der Schalldruckpegel und Schienenbeschleunigungspegel ist zunächst für ein **Monitoring an der Infrastruktur** vorgesehen, da hier alle für die Detektion eines akustisch auffälligen Flachstellen wichtigen Größen direkt erfasst werden können. Nachteilig ist jedoch die teilweise komplizierten betrieblichen Abläufe zur Informationsübermittlung und Behebung des Fehlers. An sicherheitsrelevanten Beispielen, wie etwa der Heißläuferortungsanlage hat sich jedoch gezeigt, dass ein solches System durchaus reibungslos mit allen Beteiligten ablaufen kann. Entscheidend wäre hier die Verankerung des akustischen Kriteriums als sicherheitsrelevanter Fehler, um einen ebenso reibungslosen Ablauf zu erzielen.

Für die **Erweiterung einer fahrzeugseitigen Überwachung** akustisch auffälliger Flachstellen wäre eine detailliertere Betrachtung von Detektionsalgorithmen basierend auf den am Fahrzeug erfassbaren Daten nötig. Eine deutlich frühzeitigere Behebung von detektierten Flachstellen wäre jedoch zu erwarten. Auch wurde im Rahmen der Akteursbefragung von den Infrastrukturunternehmen angeregt analog zur Heißläuferortung oder Festbremsortung eine Rundlaufortung einzuführen, um über einen Betriebs- und ECM-Automatismus grenzwertige Radsätze in einen fahrzeugseitigen Instandhaltungsprozess einzuspeisen.

Details hierzu finden sich in Kapitel 9 (ab Seite 133) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

11 Rechtliche Bewertung und Vorschläge für ein Fördersystem

Für eine Berücksichtigung der akustischen Auffälligkeiten von Vorbeifahrten mit Flachstellen im rechtlichen Rahmen wurden zunächst zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt.

Im **ersten Ansatz** wurde die Lästigkeit akustisch auffälliger Flachstellen anhand eines Pegelzuschlags quantifiziert. Hierfür wurde eine Hörversuchsreihe durchgeführt, bei welcher Versuchspersonen die Lästigkeit einer Vorbeifahrt mit Flachstellen durch eine Pegelanpassung einer Vorbeifahrt ohne Flachstellen einstellen konnten. Wurden die jeweiligen Maximalpegel der Vorbeifahrten mit und ohne Flachstellen als Differenz ΔL_{Amax} dargestellt, resultierte ein Zusammenhang zum notwendigen **Pegelzuschlag von 25 %** von ΔL_{Amax} . Auf diese Weise könnten Vorbeifahrten mit akustisch auffälligen Flachstellen mit einem entsprechenden Zuschlag auf den Mittelungspegel L_{eqTp} beaufschlagt werden. Der korrigierte Wert $L_{eqTp, korr}$ wäre im Folgenden mit den geltenden Grenzwerten, beispielsweise mit den für die Inbetriebnahme und die Umrüstung von Wagen geltenden Werte der TSI Noise, vergleichbar.

Der **zweite Ansatz** soll akustisch auffällige Flachstellen anhand eines **Grenzwerts** bewerten. Hierfür wurden die vorab im Hörversuch bezüglich ihrer Akzeptanz beurteilten Signale weiterführend analysiert. Zunächst wurde für diese Signale der durch den Flachstellen verursachte maximale A-bewertete Pegel ausgewertet. Diese Werte wurden über der von den Versuchspersonen bewerteten Akzeptanz aufgetragen. Eine angenäherte Gerade für den Zusammenhang dieser beiden Größen führt für die hier untersuchten Vorbeifahrten bei einer Akzeptanzgrenze von

- ▶ 50 % zu einem maximal zulässigen A-bewerteten Pegel von 85 dB(A),
- ▶ 30 % zu einem maximal zulässigen A-bewerteten Pegel von 86,5 dB(A).

Um einen Bezug zu den Werten der TSI Noise (in der für neue und umgerüstete Wagen höchstzulässige Mittelungspegel festgelegt sind) herzustellen, wurde der oben resultierende Maximalpegel-Grenzwert über eine Absenkung von 1,5 dB in einen Mittelungspegel-Grenzwert überführt. Somit wäre für eine Akzeptanzgrenze für akustisch auffällige Flachstellen von

- ▶ 50 % ein Mittelungspegel von 83,5 dB(A) bzw.
- ▶ 30 % ein Mittelungspegel von 85 dB(A) einzuhalten.

Auf Basis dieses Beispiels wurde im Folgenden eine rechtliche Bewertung der Umsetzung eines akustischen Flachstellenkriteriums von den WZK-Rechtsanwälten erarbeitet. Hierfür wurde zunächst ein Vorschlag zur Änderung der aktuellen Rechtslage im Rahmen des Verfassungsrechts und des Unionrechts unterbreitet. Insgesamt resultiert, dass sich die vorgeschlagenen Änderungen sehr gut in die neuere Rechtsentwicklung einfügen: so wendet sich von einem primär auf die Verhinderung von Unfällen ausgerichteten Gefahrenabwehrrecht der Blick hin zu einem umfassenderen Gefahrenabwehrrecht in Bezug auf Schienenverkehrslärm.

Des Weiteren wurden verschiedene Motivationsstrategien zur Verminderung der Anzahl von Flachstellen diskutiert. Hierbei wurden die Möglichkeiten einer Strafzahlung bei Vorhandensein einer Flachstelle oder ein Anreizsystem durch Belohnung betrachtet.

Details hierzu finden sich in Kapitel 10 (ab Seite 140) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

12 Vorschlag für ein „Akustisches Instandhaltungskriterium für Flachstellen“ – Umsetzung und Handreichung

Im nun folgenden Abschnitt sollen zusammenfassend die einzelnen erarbeiteten Bereiche dieses Forschungsvorhabens in einen Vorschlag für ein „Akustisches Instandhaltungskriterium für Flachstellen“ einfließen. Hierbei wird zur möglichen Vertiefung jeweils auf die einzelnen Kapitel dieses Berichts Bezug genommen.

Der aus dieser Arbeit resultierende Vorschlag beruht auf einem dreistufigen Konzept

In einer **ersten Stufe** steht hierbei die **Detektion akustisch auffälliger Flachstellen** bei Vorbeifahrt im laufenden Betrieb. Für das hier vorgeschlagene Detektionsverfahren ist eine Messung an der Messstrecke mit Erfassung des Luftschalldruckpegels im Abstand von 7,5 m und des Beschleunigungspegels an der Schiene nötig. Das Verfahren zur Detektion von akustisch auffälligen Flachstellen beruht schließlich auf einer logischen Verknüpfung der Maxima dieser Schalldruck- und Beschleunigungspegel. Darauf basierend wird bei einer Vorbeifahrt entschieden, ob grundsätzlich ein akustisch auffälliger Flachstellen vorliegt. Bei einer gleichzeitigen Erfassung von Wagen- bzw. Achsposition könnte so zukünftig eine wagen- oder achsgenaue Detektion erfolgen. Der dargestellte Vorschlag beruht auf der hier zugrunde liegenden Datenmenge. Bei einer größeren Datenmenge können Anpassungen hinsichtlich des Detektionsalgorithmus erforderlich werden. Hierfür ist eine Automatisierung des Detektionsalgorithmus umzusetzen und gegebenenfalls zu justieren. Die Trefferquote der automatisierten Umsetzung sollte im Folgenden mit einer größeren Datenmenge überprüft werden.

Wird also in Stufe 1 eine Flachstelle detektiert, kann in einer **zweiten Stufe** eine Bewertung erfolgen, ob die Flachstelle als akustisch auffällig einzustufen ist. Hierfür wurde ein Grenzwert für den Maximalpegel der Flachstelle vorgeschlagen, ab welchem dieser als kritisch zu bewerten ist. Da das Verfahren zur Detektion an die Abnahmemessung von neuen und umgerüsteten Fahrzeugen nach TSI Noise angelehnt werden soll, wurde der Grenzwert zudem als Mittelungspegel der Wagnervorbeifahrt auf einem den Prüfbedingungen der TSI Noise entsprechenden Gleis beschrieben.

Die Bewertung, ob eine Flachstelle als kritisch einzuordnen ist, erfolgt über die Höhe eines Grenzwerts für akustisch relevante Flachstellen. Die Festlegung dieses Grenzwerts erfolgte in der vorliegenden Arbeit abhängig von dem Prozentsatz der Akzeptanz der akustisch auffälligen Flachstellen bei Probanden. Je nach der Höhe dieser Akzeptanz, kann der Grenzwert unterschiedlich hoch gewählt werden. So resultiert für eine Akzeptanzgrenze von 50 % ein maximal zulässiger A-bewerteter Pegel von 85 dB(A) bzw. für eine Akzeptanzgrenze von 30 % ein maximal zulässiger A-bewerteter Pegel von 86,5 dB(A). Als Mittelungspegel formuliert, bedeutet dies für die 50 %-Akzeptanzgrenze ein einzuhaltender Wert von 83,5 dB(A), bzw. für die 30 %-Akzeptanzgrenze ein einzuhaltender Wert von 85 dB(A).

Die tatsächliche Festlegung des Grenzwerts ist somit eine Entscheidung darüber, welcher Prozentsatz an akustisch inakzeptablen Flachstellen als zulässig erachtet wird. Diese Entscheidung sollte nach Ansicht der Forschungsnehmer auf der politischen Ebene getroffen werden.

Bei Überschreiten des Grenzwerts, findet sich dann in der **dritten Stufe** die **Empfehlung** zur notwendigen Vorgehensweise hinsichtlich der **Instandhaltung**. Die Möglichkeiten einer diesbezüglichen betrieblichen Umsetzbarkeit wurden im Folgenden skizziert. Hierbei wäre das vorgestellte Szenario „Monitoring an der Infrastruktur“ zeitnah umsetzbar.

Details hierzu finden sich in Kapitel 11 (ab Seite 176) des Abschlussberichts zum Forschungsvorhaben.

13 Quellenverzeichnis (Auszug)

ACROMOS®, 2015. Das Messsystem acramos Produktinformation [Zugriff am: 6. Juni 2019]. Verfügbar unter: <http://www.psia.at/files/acramos.pdf>

ARGOS®. Wayside train monitoring, Weigh in motion (WIM), Wheel Impact load detection (WILD), out-of-roundness(OOR), runing behavior measurement (RBM) [online] [Zugriff am: 13. Mai 2019]. Verfügbar unter: www.argos-systems.eu;

ARNOCZKY, P.M., 1994. Flachstellenortung Qua Vadis? [online]. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 22(3-4), 129-152. ISSN 1587-3811. Verfügbar unter: <https://pp.bme.hu/tr/article/view/6628>

AVV, 1. Januar 2019. Allgemeiner Vertrag für die Verwendung von Güterwagen [online] [Zugriff am: 6. Juni 2019]. Verfügbar unter: <https://gcubureau.org/contract2019>

BMVI, 2020. Die Schiene wird leiser! Ziel des BMVI bis 2030: Um die Hälfte weniger Lärmbetroffene! [online]. 14. Dezember 2020 [Zugriff am: 10. August 2021]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/virtuelle-pk-leise-schiene.html>

BRIZUELA, J., A. IBAÑEZ, P. NEVADO und C. FRITSCH, 2010. Railway wheels flat detector using Doppler effect [online]. Physics Procedia, 3(1), 811-817. ISSN 1875-3892. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.phpro.2010.01.104

BUNDESAMT FÜR UMWELT, 2018. Forschungsprojekt "Flachstellenerkennung mit Telematik" [online] [Zugriff am: 19. November 2021]. Verfügbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=46109&Load=true>

DERNBACH, G., A. LYKARTSIS, L. SIEVERS und S. WEINZIERL, 2020. Acoustic Identification of Flat Spots On Wheels Using Different Machine Learning Techniques [online] [Zugriff am: 19. November 2021]. Verfügbar unter: https://depositonce.tu-berlin.de/bitstream/11303/11102/4/dernbach_etal_2020.pdf

DIN EN 15313:2016-09, 2016. Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radsatzinstandhaltung; Deutsche Fassung EN 15313:2016.

MALY, T., M. JAKSCH und G. DINHOBL, 2016. Schallemissionen von Laufflächendefekten [online]. Eisenbahntechnische Rundschau. Eisenbahntechnische Rundschau [Zugriff am: 17. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://eurailpress-archiv.de/SingleView.aspx?show=22972>

MÖHLER, U., D. SCHRECKENBERG, M. MÜLLER, M. LIEPERT, V. SKOWRONEK, C. BELKE und S. BENZ, 2018. Gutachten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht [online] [Zugriff am: 17. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://umwelt.hessen.de/umwelt-natur/luft-laerm-licht/laermschutz/eisenbahnverkehrslaerm>

MÜLLER-BBM RAIL TECHNOLOGIES GMBH, 17 Februar 2021, 12:00. Wheel Monitoring System (WMS) [online] [Zugriff am: 17. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.muellerbbm-rail.de/produkte/wheel-monitoring-system/>

THOMPSON, D., 2009. Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling and Means of Control [online]. s.l.: Elsevier professional. ISBN 978-0-08-045147-3. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10305588>

VANDENHOUTEN, R. und M. DEUTZER, 2005. Detektion von Flachstellen an Radreifen auf der Basis von Schallmessungen am Schienenkörper [online]. Wissenschaftliche Beiträge 2005, 10, 63-69. ISSN 0949-8214. Verfügbar unter: doi:10.15771/0949-8214_2005_1_12